



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

SAMU JÄRVINEN

TUULEN NOPEUDEN ETÄMITTAUS LIDAR-TEKNOLOGIAN
AVULLA

Diplomityö

Tarkastaja: dosentti Juha Toivonen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Luonnontieteiden ja ympäristötekni-
kan tiedekuntaneuvoston kokouk-
sessä 6. huhtikuuta 2011

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknis-luonnontieteellinen koulutusohjelma

JÄRVINEN, SAMU: Tuulen nopeuden etämittausta LIDAR-tekniikan avulla

Diplomityö, 82 sivua

Elokuu 2011

Pääaine: Teknillinen fysiikka

Tarkastaja: Dosentti Juha Toivonen

Avainsanat: LIDAR, tuuli-LIDAR, ilmakehän kaukokartoitus, lasermittaus, tuulimittaus, tuulienergia, tuulivoima

Tuulienergiateollisuudessa tehtävällä tuulen kaukokartoituksella voidaan saavuttaa huomattavia säästöjä ja vähentää ympäristöhaittoja. Mahdollisia sovelluksia ovat muun muassa tuuliturbiinien ennakko-ohjaus ja uusien asennussijaintien tuuliolosuhteiden määrittäminen. Turbiinien mukautuminen saapuviin tuulikenttiin takaa tasaisen sähköntuoton ja vähentää voimalan mekaanista rasitusta, jolloin niiden elinaikaa voidaan pidentää.

Tuuli-LIDAR on kaukokartoituslaite, joka lähettää laserpulsseja taivaalle ja mittaa tuulen nopeuden etäisessä mittaustilavuudessa pulssista takaisin laitteistolle sironneesta valosta. Lasersäteen siroaminen johtuu vuorovaikutuksesta valon ja ilmakehän aerosolien ja molekyylien kanssa. Ilmakerroksen kolmiulotteisen tuulivektorin laskemiseksi mittaus toistetaan kolmeen eri suuntaan. Mittausetäisyys valitaan laserpulssin lähdön ja sirontasignaalin saapumisen välisen viiveen avulla.

Kaupallisten LIDAR-laitteistojen hinta estää niiden asennuksen jokaiseen tuulivoimalaan. Toisaalta tuulivoimaan tarkoitettujen LIDAR-laitteiden alhaisemmat suorituskykyvaatimukset voidaan saavuttaa taloudellisemmalla lasertekniikalla ja yksinkertaisemmalla laitearkkitehtuurilla. Tässä diplomityössä kehitettiin täten kustannustehokas kuitukytetty tuuli-LIDAR alle 300 m mittausetäisyyksiin.

Diplomityössä rakennetussa laitteistossa Doppler-siirtymä havaitaan heterodyynimenetelmällä, jossa ilman aerosoleista takaisinsironnut säde sekoitetaan paikallisoskillaattorisäteen kanssa. Aiheutuu summakentän intensiteetin erotustaajuinen huojunta, joka on mahdollista havainnoida puolijohdedetektoreilla. Laitteisto toimii 1,5 μm yleisellä tietoliikennetekniikan aallonpituusalueella, mikä mahdollistaa taloudellisten komponenttien saatavuuden. Laitteistoon suunniteltiin ja koottiin mittatilaustyönä LIDAR-tekniikan vaatimukset täyttävä kuituvahvistin. Sen kaksi vahvistinastetta vahvistavat laserpulssin tehoa yli 30 dB säilyttäen signaalin kapean viivanleveyden. Diplomityön mittaukset toteutettiin 30 m pitkässä tuulitunnelissa, joka rakennettiin LIDARin suorituskyvyn määrittämistä varten. Tunnelissa kulkevaa ilmavirtaa voidaan säätää portaattomasti ja vertailumittaus suoritetaan tunnelin keskiakselilta kuumalanka-anemometrillä.

Tämä diplomityö on osa CLEEN Oy:n MMEA-tutkimusohjelmaa. Rakennettua tuuli-LIDAR-laitteistoa kehitettyä jatkuu diplomityön jälkeen Tampereen teknillisen yliopiston, Vaisala Oy:n, Modulight Oy:n, Ilmatieteen laitoksen ja Mittatekniikan keskuksen yhteistyönä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Science and Engineering

JÄRVINEN, SAMU: LIDAR Technology for Remote Sensing of the Wind

Master of Science Thesis, 82 pages

August 2011

Major: Advanced Engineering Physics

Examiner: Docent Juha Toivonen

Keywords: LIDAR, wind-LIDAR, remote sensing, wind sensing, wind energy

Remote sensing of the wind velocity in wind energy industry produces environmental and financial benefits. Potential targets of application are wind turbine site assessment measurements and turbine mounted sensors which enable the instant adaptation of blade and yaw angles to changes in the wind. This again leads to the higher output power and diminished stress of the turbine. Wind-LIDAR (Light Detection And Ranging) is a technology which transmits collimated laser light to the sky and resolves the wind speed and direction in a distant air volume by analyzing the backscattered signal from aerosols and air molecules. The wind speed in the direction of the laser beam at desired height is calculated from the Doppler shift in the scattered light. At the same time, the distance of the measurement volume can be obtained from the time-of-flight of the pulsed laser beam.

Commercial LIDARs are already available at great expense. On the other hand, the measurement range of only 300 meters is sufficient for the needs of wind turbines, which is possible to accomplish without high-priced equipment. Thus, this diploma thesis is focused on developing a cost-effective wind-LIDAR technology for lower tropospheric measurements. The price can be reduced by means of simpler design and novel laser technology. In addition, the system is completely fiber coupled in order to have a robust architecture.

In this work, the Doppler shift is detected utilizing the principle of heterodyne detection. It involves mixing a local oscillator laser output and backscattered radiation. This produces a beat signal at the difference frequency. A fiber-optic heterodyne LIDAR device was then constructed and its performance was verified experimentally in laboratory conditions. It operates at 1.5 μm wavelength region and most of the components are inexpensive and widely available telecommunication fiber components. A custom fiber amplifier was designed and built to avoid stimulated Brillouin scattering. With two short-fiber amplification stages, it provides over 30 dB amplification while maintaining the narrow linewidth of the seed laser. The experiments were carried out at controllable environment at a 30 m long wind tunnel. Inside the tunnel, the air flow rate can be adjusted and measured with high precision.

This diploma thesis is part of CLEEN MMEA research program. The wind-LIDAR development will continue by Tampere University of Technology, Vaisala Oyj, Modulight Oy, Finnish Meteorological Institute and The Centre for Metrology and Accreditation.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Optiikan laboratoriossa syksyn 2010 ja kesän 2011 välisenä aikana. Se on osa CLEEN Oy:n MMEA-tutkimusohjelmaa, joka aloitettiin vuonna 2010. Työn tavoitteena oli kehittää taloudellinen tuuli-LIDAR mittauslaitteisto tuulienergiateollisuudessa tehtävään tuulen kaukokartoitukseen. Diplomityön aikana rakennettiin myös laboratorio-olosuhteet tuulimittausten suorittamiseen sisätiloissa. Hankkeessa mukana ovat TTY:n lisäksi Vaisala Oyj, Modu-light Oy, Ilmatieteen laitos ja Mittatekniikan keskus.

Kiitän dosentti Juha Toivosta diplomityöni tarkastamisesta, käytännön neuvoista ja erityisesti ftoniikkakomponentteihin liittyvästä asiantuntemuksesta. Kiitokset kuuluvat myös Optoelektroniikan tutkimuskeskukselle kuituvahvistimen suunnittelutyöstä ja Vaisala Oyj:lle yhteistyöstä LIDAR-tutkimuksessa. Teknisestä tuesta ja pohdintahetkitä haluan kiittää Sovelletun optiikan ryhmän tutkijoita DI Jaakko Saarelaa, DI Tapio Sorvajärveä, tekn. kand. Johan Sandia ja tekn. kand. Antti Aaltoa. Mittausavusta kiitän tekn. yo. Topi Hämäläistä.

Erityiskiitokset kuuluvat vaimolleni Julialle ja tyttärelleni Lilialle tuesta ja kannustuksesta diplomityön aikana sekä kirjoitusrauhasta.

Tampereella 10.8.2011

Samu Järvinen

SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
2	Tuulen etämittaus	3
3	Tuuli-LIDAR.....	11
3.1	Sironta ja absorptio	12
3.2	LIDAR-yhtälö	15
3.3	Tuulen aiheuttama Doppler-siirtymä	17
4	Detektiomenetelmät	20
4.1	Kohina LIDAR-laitteistossa.....	21
4.2	Heterodyyni-detektio	24
4.3	Suora detektio	26
4.4	Jatkuvatoiminen ja pulssimuotoinen LIDAR.....	29
4.5	Kaupalliset tuuli-LIDAR -laitteistot	31
4.6	Ympäristön epävarmuustekijät	33
5	Heterodyyni-detektion mittauslaitteisto	35
5.1	Optiset kuidut.....	35
5.2	Faraday-isolaattorit ja -sirkulaattori.....	38
5.3	Säteenjakaajat ja -yhdistimet	39
5.4	Akusto-optinen modulaattori	40
5.5	Optoelektroniset komponentit.....	43
5.6	Erbium-rikastettu kuituvahvistin.....	49
5.7	Lähetin-vastaanotin.....	53
5.8	Laitteiston toiminta	56
6	Laitteiston arviointi	58
6.1	Mittausjärjestelyt.....	58
6.2	Sirontasignaalin käsittely	60
6.3	Alustavat tuulen nopeusmittaukset ja virhelähteet.....	62
6.4	Kehitysehdotukset.....	64
7	Yhteenveto	66

MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	Vastaanottimen tuloaukon pinta-ala
A_{ilma}	Tuulivoimalan siipien pyyhintäala
A_{LO}	LO-sähkökentän amplitudi
A_{sig}	Sirontasignaalin sähkökentän amplitudi
α	Pallosymmetrisen hiukkasen kokoparametri
β	Tilavuussirontakerroin
D	Vastaanottimen tuloaukon halkaisija
D_p	Pallosymmetrisen hiukkasen halkaisija
d	Väliaineen paksuus
d_{Airy}	Airy'n kiekon keskimaksimin halkaisija
dr	Differentiaalinen etäisyysväli
Δv_{AOM}	AOM:n aiheuttama taajuussiirtymä
$\Delta v_{Doppler}$	Doppler-siirtymä
$\Delta v_{1/2}^{Doppler}$	Doppler-viivaprofiilin puoliarvonleveys
Δv_{laser}	Laserin spektrinen viivanleveys
Δv_{sig}	Signaalin kaistanleveys
ΔR	Mittausetäisyyden erottelukyky
ΔV_{LOS}	LOS-nopeuksien erottelukyky heterodyyni-detektiossa
E_{LO}	LO-sähkökenttä
E_{sig}	Sironneen signaalin sähkökenttä
ε	Virhe LOS-tuulella suorassa detektiossa
η	LIDAR-laitteiston optinen hyötysuhde
η_{det}	Detektorin kvanttihyötysuhde
φ_{LO}	LO-sähkökentän vaihe
φ_{sig}	Sirontasignaalin sähkökentän vaihe
ϕ_{Mie}	Mie-sironnasta peräisin olevien fotonien lukumäärä
$\phi_{päivänvalo}$	Päivänvalosta peräisin olevien fotonien lukumäärä
$\phi_{Rayleigh}$	Rayleigh-sironnasta peräisin olevien fotonien lukumäärä
G	Geometrinen kerroin
\tilde{G}	Vahvistuskerroin
I	Valon intensiteetti
I_0	Reunasuotimen läpi mitattu Doppler-siirtymätön intensiteetti
\tilde{I}_0	Hiukkaseen kohdistuva irradianssi
i_d	Detektorin pimeävirta
i_j	Lämpökohinan aiheuttama virta
i_{RIN}	RIN-kohinan aiheuttama virta
i_{sig}	Detektorin fotovirta
i_{SN}	Raekohinan aiheuttama virta

\hat{k}	Lasersäteen suuntainen yksikkövektori
κ_{abs}	Absorptiokerroin
κ_{abs}^{hiuk}	Absorptiokertoimen Mie-komponentti
κ_{abs}^{kaasu}	Absorptiokertoimen Rayleigh-komponentti
κ_{sir}	Sirontakerroin
κ_{sir}^{hiuk}	Sirontakertoimen Mie-komponentti
κ_{sir}^{kaasu}	Sirontakertoimen Rayleigh-komponentti
κ_{vaim}	Spektrinen vaimennuskerroin
L	Ääniaaltorintaman leveys
Λ	Taitekerroinmodulaation jaksonpituus
N	Hiukkaskonsentraatio yksiköissä m^{-3}
n	Taitekerroin
n_{ef}	Efektiivinen taitekerroin
n_{vaippa}	Kuidun vaipan taitekerroin
n_{Im}	Taitekertoimen imaginaariosa
n_{Re}	Taitekertoimen reaaliasa
n_{ydin}	Kuidun ytimen taitekerroin
ν_0	LIDAR-laitteen lähettämä taajuus
ν'	Doppler-siirtynyt taajuus
Ω	Avaruuskulma
ω_{LO}	LO-kentän taajuus
ω_{sig}	Signaalikentän taajuus
Θ	Suoran detektion mittausherakkyys
P_{abs}	Hiukkasten absorboima teho
P_L	LIDARin lähettämä optinen teho
P_{laser}	Laserin optinen teho
P_{LO}	LO-kentän optinen teho
P_{sig}	LIDAR-laitteen vastaanottama teho
P_{sir}	Hiukkasten sirottama optinen teho
P_{tausta}	Ympäristön säteilystä johtuva optinen taustateho
P_{tuuli}	Tuulen teoreettinen teho
p	Elastisen sironnan todennäköisyys
p_Ω	Sironnan vaihefunktio
Q_{abs}	Absorptiotehokkuus
Q_{sir}	Sirontatehokkuus
Q_{vaim}	Vaimennustehokkuus
R	Mittausetäisyys
r_{ydin}	Kuidun ytimen säde
ρ	Ilman tiheys
$S(\nu)$	Spektrinen kohinatehon tiheysfunktio

σ_{abs}	Hiukkasen absorptiovaikutusala
σ_{sir}	Hiukkasen sirontavaikutusala
σ_{vaim}	Sironta- ja absorptiovaikutusalojen summa
T	Ilmakehän transmissio
\tilde{T}	Lämpötila
τ	Laserpulssin ajallinen pituus
τ_{ai}	Aikaikkunan leveys
τ_c	Koherenssiaika
θ	Polarisaatiotason kiertokulma
θ_{diff}	Diffraktiokulma
V	Tuulen nopeuden alaa A_{ilma} vastaan oleva komponentti
V_{aalto}	Aaltoliikkeen etenemisnopeus
V_H	Havaitsijan nopeus
V_L	Aaltoliikkeen lähteen nopeus
V_{LOS}	Tuulen nopeus lasersäteen suunnassa
\underline{V}_{tuuli}	Tuulivektori
$V\#$	V-luku
\mathcal{V}	Verdet-vakio
Z	Detektorin ulostuloimpedanssi
AOM	Akusto-optinen modulaattori
APD	Vyöryläpilyöntidiodi (Avalanche Photo Diode)
ASE	Vahvistunut spontaani emissio
CCD	Sähköinen valonilmaisin (Charge-Coupled Device)
DFB	Kehittynyt laserrakenne (Distributed FeedBack)
DIL	Yleinen elektroniikkakotelo (Dual In-Line)
DWDM	Tietoliikennetaajuusverkosto
FBG	Jaksollinen rakenne optisessa kuidussa (Fiber Bragg Grating)
FC/APC	Vinoon kiillotettu kuituliitin (Angled Physical Contact)
FC/FL	Suora kuituliitin (Flat end)
FC/PC	Perinteisin kuituliitin (Physical Contact)
FC/SPC	Erikoiskiillotettu kuituliitin (Super Physical Contact)
FC/UPC	Erikoiskiillotettu kuituliitin (Ultra Physical Contact)
IEC	Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
IR	Infrapuna
ITU-T	Kansainvälinen televiestintäliitto televiestintäsektori
LIDAR	Laservalon sirontatutka (LIght Detection And Ranging)
LO	Paikallisoskillaattori (Local Oscillator)
LOS	Nopeus säteen suunnassa (Line-Of-Sight)
LTV	Tuulen nopeuden mittaussuunnassa
MFD	Muodon halkaisija yksimuotokuidussa

NA	Numeerinen aukko
PM	Polarisaation pitävä (Polarization Maintaining)
RASS	Tutka-kaikuluotain (Radio-Acoustic Sounding System)
RF	Radiotaajuuksinen (Radio Frequency)
RIN	Suhteellinen intensiteettikohina (Relative Intensity Noise)
SAR	SAR-tutka (Synthetic Aperture Radar)
SBS	Stimuloitu Brillouin Sirona
SM	Yksimuotoinen (Single Mode)
SMA	Amphenol-yhtiön kehittämä kuituliitin
SNR	Signaali-kohina –suhde (Signal to Noise Ratio)
SNR _{hd}	Heterodyyni-detektion signaali-kohina –suhde
SNR _{sd}	Suoran detektion signaali-kohina –suhde
SODAR	Ilmakehän kaikuluotaintekniikka
TGG	Terbium-gallium-granaatti, yleinen Faraday-kennomateriaali
UV	Ultravioletti
WDM	Eritaajuisten optisten signaalien yhdistäjäkomponentti

1 Johdanto

Fossiilisten polttoaineiden ehtyminen, ilmastonmuutos ja ydinjätteiden sijoitusongelmat ovat tasaisesti nostaneet uusiutuvien energialähteiden suosiota viimeisten vuosikymmenien aikana. Nopeimmin kasvaa tuulivoimalla tuotettu uusiutuva energia [1]. Monille tuulivoimateollisuus onkin niin sanotun puhtaan energian vertauskuva. Todellisuudessa tuulivoimaan liittyy huomattavia taloudellisia ja ympäristöuhkia. Suuret tuulivoimalat eivät ole pitkäikäisiä ja niiden sähköntuottovarmuus eli käyttökerroin, 0,20 Suomessa vuonna 2009 [2], verrattuna esimerkiksi ydinvoimalaan, 0,96 Olkiluodossa vuonna 2009 [3], on vaatimaton. Riskinä on myös voimalan asennus tuuliolosuhteiltaan kannattamattomalle sijainnille.

Toimintavarmuutta voidaan parantaa ja riskejä pienentää tarkalla tuulimittauksella, joka suoritetaan etäisyyden päästä tuulen kuljettamasta ilmamassasta. Sovelluksesta riippuen etämittauksella voidaan määrittää tuulivoimalalle saapuvia tuulikenttiä reaaliaikaisesti tai kartoittaa tietyn alueen tuuliolosuhteita pitkän aikavälin mittauksella. Seurausena tuulivoimaloiden käyttöikä pitenee ja tuulen energiasisällöstä saadaan suurempi osa muutettua sähköksi. Kilpailukykyisin tuulen etämittausteknologioista on tuuli-LIDAR (engl. LIght Detection And Ranging), joka tunnustelee lasersäteen avulla kaukaisen tilavuuden tuulen suunnan ja nopeuden. Tuuli-LIDAR -laitteita on käytössä lentokentillä, meteorologiassa ja ilmakehän ulompien kerrosten tieteellisessä tutkimuksessa. Kaupallisestikin saatavilla olevien tuuli-LIDAR -laitteiden hinta estää kuitenkin niiden asennuksen yksittäisiin tuulivoimaloihin. Kustannustehokkaassa LIDAR-teknologiassa, jonka mittausmatka olisi noin 300 m – etäisyys, joka riittää tuulivoimateollisuuden tarpeisiin – on täten valtava kaupallinen potentiaali. [4]

Tämä diplomityö on osa suomalaisen CLEEN Oy:n (engl. Cluster for Energy and Environment) keväällä 2010 alkanutta MMEA-tutkimusohjelmaa (engl. Measurement, Monitoring and Environmental Assessment) [5]. Työn aiheeksi rajattiin tuuli-LIDAR-laitteiston suunnittelu ja rakentaminen. Lisäksi valmistettiin laboratoriokoeolosuhteet tuulen etämittaukseen ja lopuksi teknologian toimivuus todennettiin rakennetussa mittausjärjestelyssä. Työ toteutettiin Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Optiikan laboratoriossa. Tutkimukseen osallistuivat TTY:n lisäksi Vaisala Oyj, Modulight Oy, Ilmatieteenlaitos ja Mittatekniikan keskus (MIKES).

Tuuli-LIDARin rakentamiseen ei ole yhtä oikeaa tapaa, vaan laitteistot ryhmitellään detektiomenetelmänsä perusteella. Yhteistä menetelmille on Doppler-siirtymän suuruuden määrittäminen lasersäteestä takaisin laitteistolle sironneesta valosta. Diplomityössä selvitettiin eri detektiomenetelmien etuja ja haittoja ja päätettiin hyödyntää heterodyynitekniikkaa. Menetelmässä kaksi signaalia, joiden taajuudet poikkeavat vain vähän toisis-

taan, sekoitetaan hyvin tunnetun huojuuntailmiön aikaansaamiseksi. Suunnittelussa ja komponenttien valinnassa huomiota kiinnitettiin taloudelliseen toteutukseen. Mittauslaitte rakennettiin lähes pelkästään tietoliikennetekniikkaan tarkoitetuista komponenteista, joiden valmistajia löytyy markkinoilta runsaasti. Diplomityön laitteistoon koottiin myös kuituvahvistin, joka suunniteltiin TTY:n Optoelektroniikan tutkimuskeskuksessa (ORC) heterodyynidetektion tarpeisiin. Laitteiston kehitystyö ei ole valmis. Teknologian saataminen kaupallisten laitteiden tasolle ja laitteiston hyvyyslukujen, kuten mittaustarkkuuden, määrittäminen on suunnitteilla toteuttaa tutkimusohjelman seuraavassa vaiheessa.

Diplomityön aluksi tarkastellaan LIDAR-tekniikan käyttökohteita syvemmin. Kolmannessa luvussa käydään läpi LIDARin toiminnan taustalla olevia fysikaalisia prosesseja kuten valon siroaminen ja Doppler-ilmiö. LIDAR-detektio menetelmien esittely ja vertailu ovat luvussa 4. Luvun 5 aluksi tutustutaan kuituoptiikan yleisimpiin käsitteisiin, jonka jälkeen käsitellään käytettyjen komponenttien toimintaperiaatteita ja niiden yhteistoimintaa LIDAR-laitteistossa. Rakennetut tuulimittausolosuhteet ja diplomityön aikana tehdyt tuulimittaukset ovat esitetty Laitteiston arviointi –luvussa, jossa myös käsitellään mahdollisia virhelähteitä. Lopuksi pohditaan tutkimuksen tulevaisuuden kannalta oleellisia suorituskykyä parantavia kehityssuuntia.

2 Tuulen etämittaus

Planeettamme ja ulkoavaruuden välillä ei ole selvää rajaa. Uloimman kerroksen maalle antaa painovoiman sitoma kaasujen seos, jota kutsutaan ilmakehäksi. Sen massasta vain yksi prosentti on 30 km yläpuolella ja tuhannen kilometrin korkeudella ilma on ohuempaa kuin mikään ihmisen tekemä tyhjiö. Noin 80 km korkeudelle asti ilmakehä on homogeeninen eli siinä olevat kaasut esiintyvät samoissa suhteissa: typpeä 78,1 %, happea 20,9 %, argonia ja muita jalokaasuja 0,93 % sekä hiilidioksidia 0,035 %. Poikkeuksen homogeenisuuteen tekevät otsoni, joka on kerääntynyt 15–25 km korkeudelle ja vesihöyry. Kaasujen lisäksi ilmakehässä leijaillee kiinteitä savu- ja pölyhiukkasia. Vettä esiintyy aineen kaikissa olomuodoissa. [6,7]

Maahan tulevasta auringon sähkömagneettisesta säteilyenergiasta keskimäärin 65 % absorboituu maanpintaan, meriin ja ilmakehään. Muu osa heijastuu takaisin avaruuteen. Absorboitunut säteily muuttuu lämpöenergiaksi ja maanpinnan ja ilmakehän lämpötila kohoaa. Maapallo säilyttää säteilytasapainonsa säteilemällä saman määrän lämpöä takaisin avaruuteen. Mikroskooppisesti ilmakehän lämpeneminen tarkoittaa kaasujen molekyylien liike-energian kasvamista. Koska auringon säteilyenergia ei kuitenkaan jakaudu maapallolla tasaisesti napa- ja päiväntasaaja-alueiden välillä, ilmakehän lämpenemisellä on myös makroskooppisia vaikutuksia. Näitä ovat ilman paine-erot, jotka syntyvät kun ilmakehä ja valtameret siirtävät energiaa päiväntasaajalta navoille. Painegradientti, eli paine-ero pituusyksikköä kohti, osoittaa korkeammasta paineesta matalampaan päin ja aiheuttaa ilmakehän kaasujen molekyylien kollektiivisen liikkeen. Syntynyttä vektorisuuretta kutsutaan tuuleksi, joka ei kuitenkaan ole täysin painegradientin suuntainen. Ilmapaketin liikkeeseen vaikuttavat lisäksi maapallon pyörimisliikkeestä johtuva, gradienttiin nähden vastakkainen, näennäinen coriolisvoima ja kitkavoima, joka jarruttaa virtausta. Kitkavoimaan vaikuttaa maanpinnan rosoisuus, joka on minimissään merellä. Rosoisella pinnalla tuulennopeus kasvaa hitaasti maanpinnalta ylöspäin mentäessä. Merialueilla tuulennopeus saavuttaa maksiminopeutensa hyvin lähellä merenpintaa ja tuuli on lisäksi tasaista eli laminaarista. Mantereella tuuli on harvoin tasaista, vaan siihen syntyy pyörteitä. Maanpinnan lähellä pyörteisyys aiheuttaa äkkinäisiä satunnaisia tuulen suunnan ja nopeuden muutoksia, joita kutsutaan puuskaisuudeksi. Kaoottinen virtaus voi myös olla pyörteistä. Jos tällainen virtaus lisäksi lisää väliaineen sekoittumista, puhutaan turbulenssista. [6-9]

Ilmakehän etämittauksessa eli kaukokartoituksessa (engl. remote sensing) mittalaite ei ole fyysisessä kosketuksessa mitattavan ilmakerroksen kanssa. Tavallisesti vuorovaihtus mittalaitteiston ja mitattavan objektin kanssa tapahtuu sähkömagneettisen säteilyn tai akustisten aaltojen kautta. Mittaus voi tapahtua esimerkiksi maasta, lentokoneesta tai

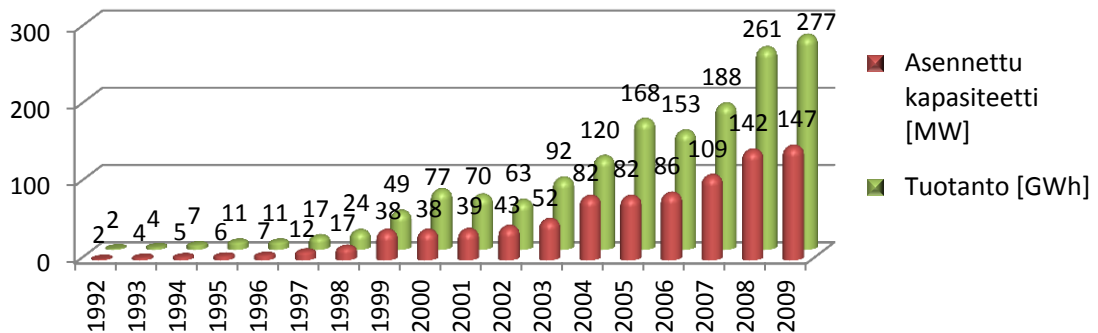
satelliitista käsin. Kaukokartoituksella voidaan muun muassa tutkia etäisen tilavuuden lämpötilaa, kosteutta, eri aineiden ja aerosolien pitoisuuksia tai pienhiukkasten kuten vulkaanisen tuhkan määrää. Suurin määrä sovelluskohteita on kuitenkin tuulen nopeuden tarkasti mittaavalla kaukokartoitusmenetelmällä. Tuulen nopeuden ja suunnan etämittausta tarvitaan meteorologiassa paikallisten säähavaintojen tekoon, jotka voivat muun muassa olla osana ilmakehän rajakerrosten monitorointia tai laajempaa sääennustetta. Tietyissä sovelluksissa, kuten purjehduskilpailuissa, kaukokartoitusta käytetään horisontaalisten ja vertikaalisten tuulikenttien määrittämiseen eli tuuliprofilointiin. Sotilasmeteorologiassa tuulen etämittausta voidaan hyödyntää tykistön ja raketinheittimien ballistiikassa. Etämittausten vastakohta meteorologiassa ovat säähavaintopalloon kiinnitetävän radiosondin avulla tehtävät luotaukset, jotka ovat ilmakehän *in situ* – mittauksia. Tällä hetkellä etämittausteknologiaa käytetään luotausten tukemiseen tai osittaiseen korvaamiseen. Kaukokartoitusteknologioita ovat optista aallonpituusaluetta hyödyntävän LIDARin ohella esimerkiksi SODAR (engl. Sound Detection And Ranging), RASS (engl. Radio-Acoustic Sounding System), SAR (engl. Synthetic Aperture Radar) ja mikroaaltotaajuiset sirontamittarit (engl. scatterometry). SODAR lähettää ja vastaanottaa ääniaaltoja, kun taas RASS yhdistää akustisten ja sähkömagneettisten aaltojen hyväksikäytön. LIDAR, SODAR ja RASS mittaavat tuulen nopeuden suoraan Doppler-ilmiöstä. Mikroaaltosirontamittaukset sekä säärintamien ja lumipeitteidenkin tutkimuksiin käytetty SAR ovat sen sijaan satelliittipohjaisia etämittausmenetelmiä ja tuulen mitaus niillä perustuu kalibraatiomenetelmiin. [4,10,11]

LIDAR-teknologian historia alkaa 1930-luvun valonheitinkokeista - paljon ennen toimivan laserin keksimistä. Valonheittimellä pystyttiin jo vuonna 1939 mittaamaan aerosoli- ja molekyyliitiheyttä jopa 34 km asti [12,13]. Rubiinilaserin myötä LIDAR yleistyi ilmakehän tutkimisessa kaikissa ilmakehän kerroksissa. Observatorioissa, kuten pohjoisnavalla tai Arecibossa Puerto Ricossa, ilmakehän ominaisuuksia tutkitaan LIDAR-teknologialla 100 km korkeudelle asti. Tuulennopeuksia näissä talon kokoisissa LIDAR-laitteistoissa voidaan mitata jopa 80 km korkeudelta [14-17]. LIDAR-laitteistoja on tällä hetkellä asennettuna myös lentokoneisiin [14], laivoihin [14,18] ja satelliitteihin [14,19]. Tuuli-LIDARien kehitys alkoi 1960-luvun puolivälissä, kun heterodyyni-menetelmää keksittiin soveltaa optiseen tuulennopeuden mittaukseen. Foreman ja Huffaker suorittivat ensimmäiset tuulimittaukset vuonna 1964, missä he demonstroivat teknologian soveltuvuutta lentokoneen jättöpyörteiden tutkimukseen [16,20]. Nykyinen LIDAR-tutkimus pyrkii kehittämään vaihtoehtoisia, mutta suorituskyvyltään heterodyyni-menetelmään vertailukelpoisia, mittaustekniikoita alailmakehän tuulimittauksiin [21-25]. Toisaalta tämän hetken kaupallisia tuuli-LIDAREita, kuten ZephIR- tai Windcube-laitteita, käytetään yleisesti ilmakehän rajakerrosten, turbulenttisten virtausten ja tuuliprofiilien tieteelliseen tutkimukseen [26-29].

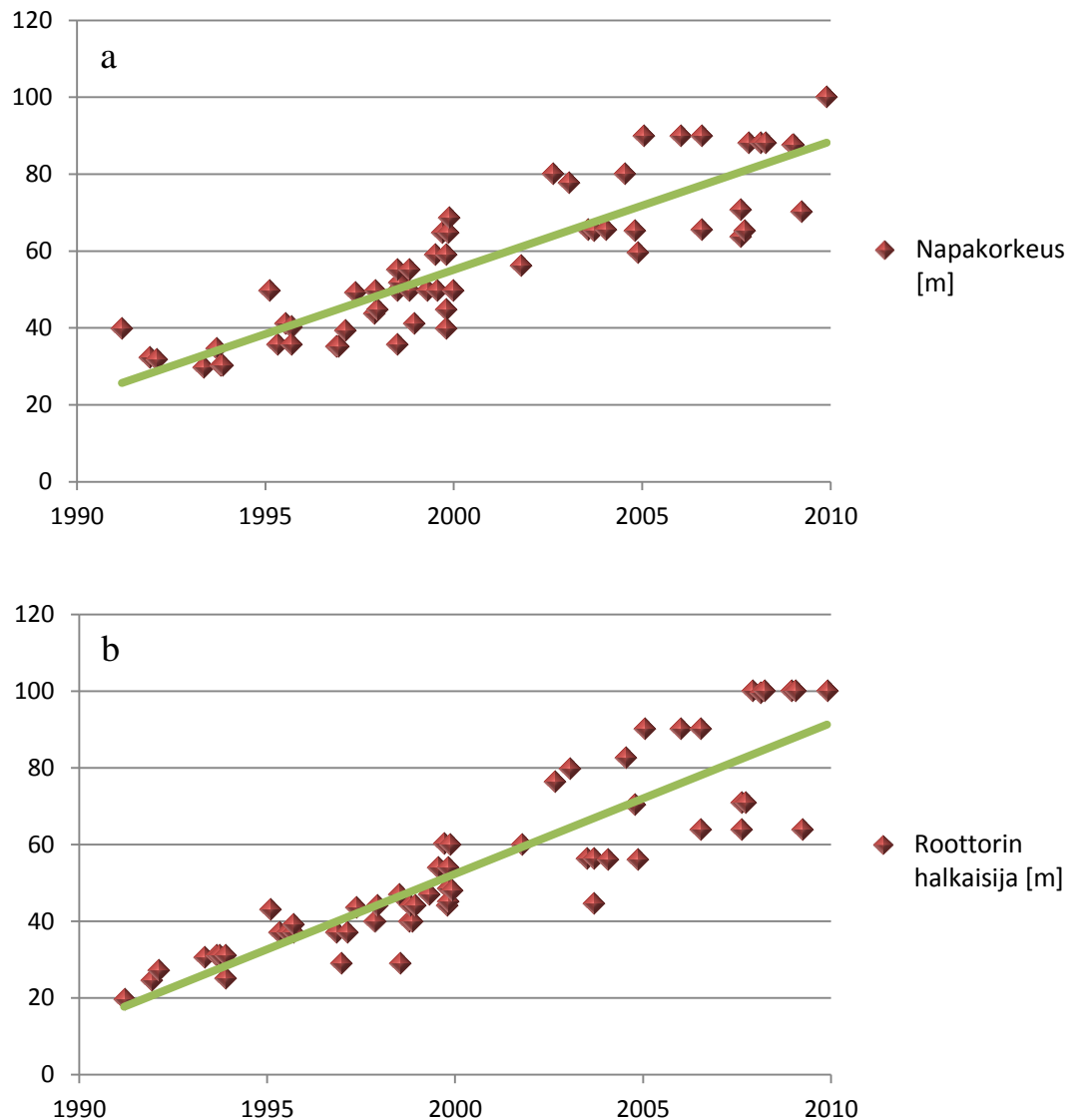
Yksi tärkeimmistä perinteisen meteorologian ulkopuolelle jäävistä tuulen etämittauksen käyttökohteista on lentokentillä tehtävä lentosään tarkkailu. Painopiste on varoitussjärjestelmässä, joka havaitsee säässä tapahtuvat epäsäännönmukaiset ilmiöt kuten tuuliväänteet. Tuuliväänteeksi (engl. windshear) kutsutaan jyrkkiä tuuligradientteja,

jotka aiheuttavat voimakkaita vertikaalisia tai horisontaalisia lyhytaikaisia suihkuvirtauksia. Sen epäillään olevan vastuussa satojen ihmisten kuolemista useissa lento-onnettomuuksissa. Erityisen suuren vaaran tuuliväanne aiheuttaa lentokoneen laskussa ja lentoon lähdössä, jolloin koneen nopeus on pieni ja pilotilla hyvin vähän aikaa reagoida tuuliväanteen aiheuttamiin korkeuden muutoksiin. [30]

Tuulivoimateollisuus on kolmas tässä diplomityössä esiteltävä tuulen etämittausta soveltava toimiala. Etämittausteknologian sovelluskohteena tuulienergia on potentiaallinen ja ajankohtainen. Vuoden 2010 lopussa Suomessa oli 130 tuulivoimalaa, joiden yhteenlaskettu tuotantokapasiteetti on 197 MW. Toisaalta tammikuun 2011 loppuun mennessä julkaistujen, Suomessa vireillä olevien, tuulivoimalahankkeiden yhteenlaskettu teho on noin 6000 MW [31]. Tuotannon nostamiseksi tuulivoimaloiden koko on kasvanut huomattavasti. Nykyisten 5 MW tuulivoimaloiden napakorkeudet ovat yli 100 m ja roottorin halkaisija saattaa olla yli 120 m. Kuva 2.1 havainnollistaa tuulivoiman suosion räjähdysmäisen kasvun ja kuvat 2.2 a ja b tuulivoimaloiden koon kehityssuunnan. [2,4,31,32]



Kuva 2.1 Tuulivoimalla tuotetun energian kasvu ja tuulivoiman asennukset Suomessa vuosina 1992 – 2009. [2,32]



Kuva 2.2 Tuulivoimaloiden koon kehittyminen Suomessa.

- a) Suomessa pystytettyjen tuulivoimaloiden napakorkeuden ja
 b) roottorin halkaisijan kehitys vuosina 1990-2010. [2,32]

Mittausvaatimusten ja olosuhteiden vuoksi LIDAR on käyttökelpoisiin etämittausmenetelmä tuulienergiateollisuudessa. SODAR ei muun muassa heikomman mittaus-tarkkuutensa, hitautensa ja alttiutensa heijastuksiin kiinteistä pinnoista, kuten tuulivoimaloista, takia ole kilpailukykyinen LIDAR-teknologiaan verrattuna. Tuulen nopeutta ja suuntaa mittaava LIDAR soveltuu esimerkiksi seuraaviin tuulienergiateknologian käyttökohteisiin [4,31,33-37]:

1. Tuulivoimaloiden sijoituspaikan arviointimittaukset – Tuulivoimaloiden rakennuskynnystä tulee alentaa. Huolellinen ja luotettava tuuliolosuhteiden mittaus pienentää tuulivoimaprojektien taloudellista riskiä ja maksimoi tuotettavan energian määrän. Tällä hetkellä mittaukset suoritetaan IEC-standardien mukaisesti pystyttämällä tuulimittaustorni, jonka korkeus on tyypillisesti 60 ja 100 m välillä. Mittauskampanja kestää 1-2 vuotta ja kustannukset lähteestä riippuen [31,38] ovat 40 000 – 100 000

euroa. Tuulta mitataan 2-3 eri korkeudelta kuppi- tai ultraäänianemometrin avulla, joka antaa tuulen nopeustiedon pistemäisessä kohteessa. Tuuliturbiinien roottorin läpimitan ja napakorkeuden kasvaessa pistemäinen mittaus ei kuitenkaan realistisesti kuvaa roottorin kokemaa tuulikenttää. LIDAR-laitteiden käyttö mittaustasot korvaavana standardina mahdollistaa vaivattomamman mittauksen usealta eri korkeudelta samanaikaisesti. Maanpinnalla toimiva laite lähettää lasersäteitä useaan eri suuntaan kartiomaisesti, jolloin tuulitieto muodostetaan useasta eri pisteestä. Jos mittauskartion akselin suuntaa lisäksi muutetaan pyyhkivästi, voidaan mittausdatasta laskennallisesti rakentaa kolmiulotteinen tuulikenttä. LIDAR-mittausten on todettu korreloivan erinomaisesti anemometrimittausten kanssa.

2. Tuulienergian resurssikartoitukset – Globaaleja tuulen voimakkuuskarttoja eli tuuliatlaksia kartoitetaan niin maalla kuin merellä. Tavoitteena on löytää maapallon sopivimmat sijainnit merelle (engl. offshore) ja mantereelle (engl. onshore) rakennettaville tuulipuistoille ja –turbiineille. Mukana projektissa on tuulivoimayhtälöiden lisäksi useita muita toimijoita kuten investointipankkeja. Tuulikartoissa samoin kuin edellisessä sovelluksessa suurin sallittu virhe keskituulennopeudessa on 1 %. Tämä vastaa 3 % virhettä keskimääräisessä tuotetussa tehossa kuten seuraavan kohdan yhtälöstä käy ilmi.
3. Tuuliturbiinien reaaliaikainen ohjaus – Alaa A_{ilma} kohtisuoraan olevan tuulikomponentin teho on yhtälön 1 mukaan riippuvainen tuulen nopeuden V kolmanteen potenssiin

$$P_{tuuli} = \frac{1}{2} \rho A_{ilma} V^3, \quad (1)$$

missä ρ on ilman tiheys. Tuulen nopeuden kaksinkertaistuessa sen liike-energia siis kahdeksankertaistuu. Tästä syystä tuulen epäsäännölliset suunnan muutokset ja turbulenssi vaikuttavat huomattavasti tuulen energiasisältöön. Tuulivoimaloissa seurauksena on jännitteen vaihtelu sähköverkossa. Välkynnäksi (engl. flicker) kutsuttu ilmiö saattaa nimensä mukaisesti aiheuttaa esimerkiksi valojen välkyntää. Hetkellisten tuulen nopeuden vaihteluiden vaikutus yksittäisen tuuliturbiinin tuottamaan keskimääräiseen tehoon on pieni. Vaikutus on kuitenkin vakavampi tuulipuistoissa, joissa turbiinit aiheuttavat pyörteisiä, usein turbulenttisia jättövirtauksia (engl. wake), jotka saattavat aiheuttaa tuotantohäviöitä ympäröivissä tuulivoimaloissa. Toisinaan tuulen nopeuden kasvaessa voi olla myös tarpeellista rajoittaa tuotettu teho suurimpaan mahdolliseen arvoon tai arvoon, jossa tuulivoimalalla on paras hyötysuhde.

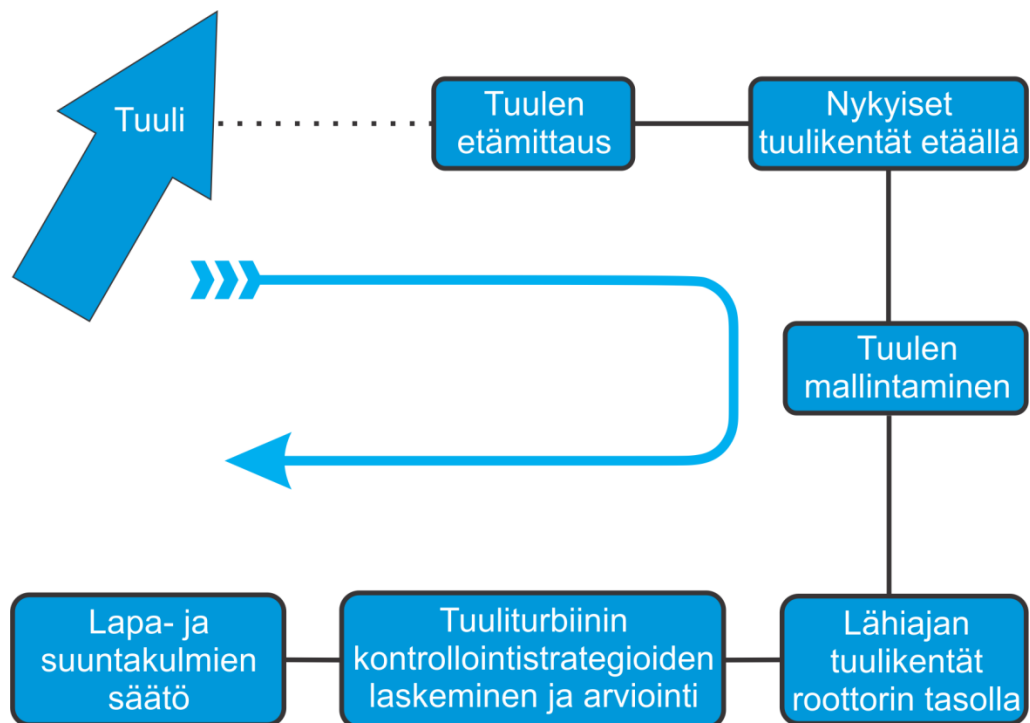
Tehohäviöitä huomattavampi merkitys on kuitenkin turbulenssin, tuulenpuuski- en ja tuuligradientin vaikutuksella tuulivoimaloiden elinikään. Mitä enemmän turbiinin sijoituspaikassa on tuulen epäsäännönmukaisuutta sitä voimakkaammalle rasitukselle voimala ja sen osat joutuvat. Tämä lyhentää vastaavasti turbiinin käyttöikää. Meren pieni rosoisuus ja vähäiset lämpötilanvaihtelut johtavat pienempään

turbulenttisuuteen. Offshore-turbiinien odotettu elinikä onkin pidempi kuin vastavien onshore-turbiinien. Edellä mainittu tuuliväanne aiheuttaa kuormitusta varsinkin suurille roottoreille. Vääntömomentti aiheutuu kun roottorin kehän toisessa ääripäässä tuulen nopeus on eri kuin vastakkaisessa päässä.

Tuulivoimalan rasitusta voidaan pienentää ja sen energiatehokkuutta parantaa säätämällä voimalan siipien lapakulmia ja muuttamalla roottorin kehän suuntakulmaa. Voimaloiden lapoihin voidaan myös asentaa esiin nousevia jarrutussiivekkeitä. Jotta säätömekanismi toimisi automaattisesti, täytyy tuulivoimalan kohtaamaa tuulta monitoroida. Nykyään käytössä olevat mekaaniset ja ultraäänisensorit havaitsevat tuulen muutokset vasta turbiinin kohdalla. Menetelmässä on tällöin tarpeeton viive, joka on mahdollista poistaa saapuvan tuulikentän etämittauksella. LIDAR-laitteisto voidaan asentaa tuulivoimalan konehuoneeseen eli naselliin tai maanpinnalle turbiinin läheisyyteen. Tuulivoimaan tarkoitetun LIDAR-teknologian tulisi kyetä mittaamaan tuulikenttä turbiinin etupuolelta muutaman kymmenen metrin etäisyydeltä aina noin 300 m asti. Tätä on havainnollistettu kuvassa 2.3. Tuulen nopeustarkkuus tulisi olla 0,1 m/s ja etäisyyden erottelukyky eli paikkaresoluutio 10–20 m luokkaa. Tuulen suuntatarkkuus kaupallisilla laitteilla on tällä hetkellä noin 1,5°. Ennakoiva turbiinikontrollointi perustuu etämittaustiedon lisäksi laskennallisiin malleihin kuvan 2.4 mukaisesti. Nämä mallit ennustavat kaukana mitatun, turbiinia lähestyvän, kolmiulotteisen tuuliprofiilin perusteella roottorin tulevaisuudessa kohtaaman tuulikentän. Turbiini ikään kuin valmistautuu turbulenttisen virtauksen kohtaamiseen. LIDAR voi tulevaisuudessa olla vakiovarusteena jokaisessa tuulivoimalassa. Tämä edellyttää kuitenkin nykyisten kaupallisten laitteiden hinnan huomattavaa laskua.



Kuva 2.3 Tuulivoimalan konehuoneeseen asennettu LIDAR on osa ennakkoivaa turbiininohjauksjärjestelmää.

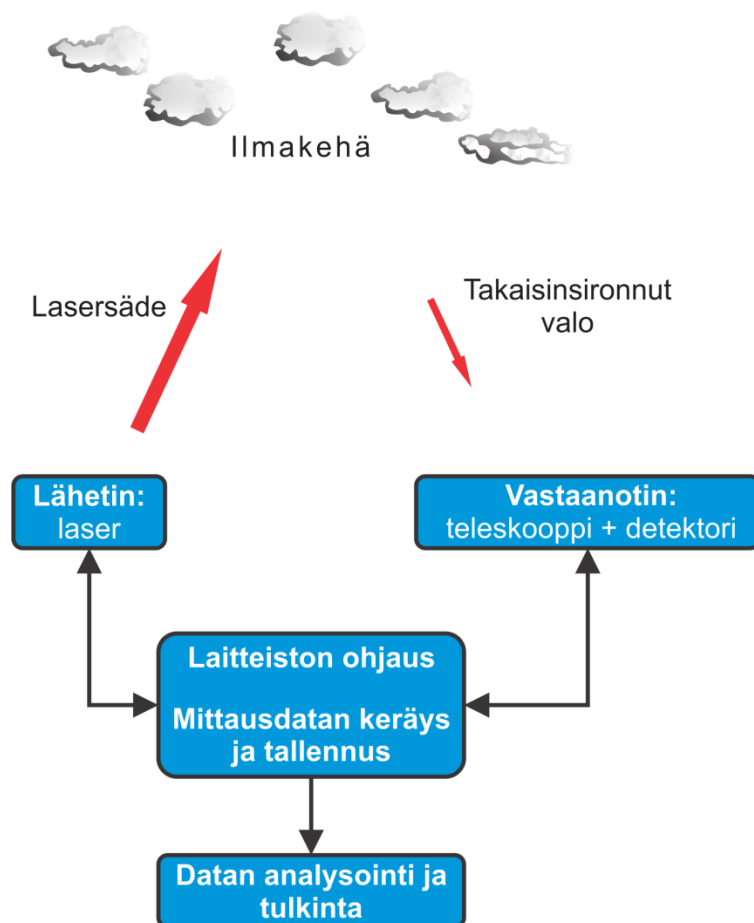


Kuva 2.4 Ennakoivassa turbiininohjauksjärjestelmässä yhdistyvät etämittausteknologia ja tuulikenttien mallinnus mittausdatan perusteella.

4. Tuuliturbiinien tehokäyrän määrittäminen – Tuulivoimalavalmistajat, tuulipuistoyhtiöt tai yksityiset tuulivoimalaomistajat ovat kiinnostuneita tuulivoimaloidensa tehokkuudesta. Tuulivoimateknologiassa usein käytetty tunnusluku on huipunkäyttöaika, joka on tuotetun tehon ja voimalan nimellistehon suhde. Tässä tekstissä tehokkuudella tarkoitetaan hyötysuhdetta tuulen liike-energian ja tuotetun sähkön välillä. Huipunkäyttöaika voi täten olla tuulisena vuonna korkea, vaikka turbiinin tehokkuus olisi heikko. IEC-standardoitu mittaus tuotetun tehon ja tuulennopeuden riippuvuussuhdekäyrän määrittämiseen vaatii tuulimittaustornin rakentamisen ja piste-mäisen anemometrimittauksen tuulivoimalan läheisyydessä. Toisaalta tuuli-LIDAR antaa mahdollisuuden kolmiulotteisen tuuliprofiilin määrittämiseen, jolloin myös roottorin tasolla oleva tuuligradietti otetaan paremmin huomioon. Näin saavutetaan tarkempi arvio kineettisen energian vuosta ja täten tuulivoimalan tehokkuudesta. LIDAR-laitteiden luotettavuuden parantuessa, paine standardien muuttamiselle onkin kasvanut.

3 Tuuli-LIDAR

Tuuli-LIDAR havaitsee Doppler-siirtymän ilmakehästä laitteistolle takaisinsironneessa valossa. Siirtymä on seurausta ilmakehässä olevien aerosolihiukkasten ja ilman molekyylien kollektiivisesta liikkeestä eli tuulesta. Sen suuruus on verrannollinen mittaustilavuudessa olevan tuulen voimakkuuteen säteen suunnassa. LIDAR-laitteiston pääosat esitetään kuvassa 3.1. Kaupallisestikin saatavilla olevat tuuli-LIDAR -mittalaitteistot voidaan jaotella alakategorioihin tuulen nopeuden määrittystavan mukaan. Tässä luvussa esitetyt fysikaaliset prosessit kuten valon siroaminen sekä Doppler-ilmiö ovat kuitenkin kaikkien tuuli-LIDAR -laitteiden toiminnan perusta detektiomenetelmästä riippumatta.



Kuva 3.1 LIDAR-laitteiston pääkokonaisuudet käytetystä teknologiasta tai mitattavasta suureesta riippumatta.

3.1 Sironta ja absorptio

Optisella taajuudella värähtelevän sähkömagneettisen kentän eli valonsäteen kohdatessa atomijoukko, yksittäisen atomin ja kentän vuorovaikutusmekanismi riippuu paitsi atomista myös kentän taajuudesta. Saapuvan kentän vaikutuksesta atomin elektronipilvi alkaa värähdellä kentän taajuudella. Yhdessä positiivisen ytimen kanssa elektronipilvi muodostaa oskilloivan sähkömagneettisen dipolin, joka välittömästi alkaa luovuttaa energiaa säteilemällä valoa suuntaan, joka voi poiketa huomattavasti alkuperäisen kentän suunnasta. Syntyneen eli sironneen fotonin energia on sama kuin oskilloinnin aiheuttaneen fotonin energia ja sironnan sanotaan olevan elastista. Sirottajahiukkasten ollessa lämpöliikkeessä, sirontavalossa havaitaan hyvin pieniä taajuuseroja alkuperäiseen kenttään nähden. Tämä on seurausta Doppler-ilmiöstä ja sironneen valon taajuusjakaumaa eli spektriä kutsutaan Doppler-levenneeksi. Jos hiukkaset ovat lämpöliikkeen lisäksi kollektiivisessä liikkeessä, myös sironneen valon keskitaajuus siirtyy. Molemmista tapauksissa sironnan sanotaan olevan kvasi-elastista.

Kullekin alkuaineelle ominaiset resonanssitaajuudet vastaavat atomin viritystilojen ja perustilan välisiä energiaeroja. Jos saapuvan kentän taajuus on lähellä atomin resonanssitaajuutta, atomi voi absorboida kentästä tietyn määrän valoa virittyen näin korkeammalle energiatilalle. Tällöin yksi tai useampi atomin elektroneista siirtyy perustilaansa korkeammalle elektronitilalle. Molekyylien tapauksessa viritystila koostuu tavallisesti myös ylemmästä vibraatio- ja rotaatiotilasta. Itsestään tapahtuvaa transitiota takaisin perustilalle kutsutaan spontaaniksi emissioksi eli fluoresenssiksi, jos samalla emittoituu fotoni, jonka energia vastaa tilojen välistä energiaeroa. Viritystilän purkautuminen voi tapahtua myös säteilemättä, jolloin viritystilän energia muuttuu nopeasti törmäysten kautta lämpöenergiaksi. Sironnut valo voi myös olla eritaajuisia alkuperäisen kentän kanssa, jos sirottajina toimivat atomien sijasta molekyylit. Tällaista epäelastista sirontaa, joka ei kuitenkaan ole resonanssi-ilmiö, kutsutaan Raman-sironnaksi.

Pallosymmetrisen hiukkasen sirottaman ja absorboiman valon matemaattista käsitteilyä kutsutaan fysiikassa Mie-teoriaksi tai Mie-Debye-Lorenz -teoriaksi. Siinä sirontaan ja absorptioon vaikuttavat tärkeimmät tekijät ovat hiukkaspitoisen ilman kompleksinen taitekerroin

$$n(\lambda) = n_{Re}(\lambda) + in_{Im}(\lambda), \quad (2)$$

joka kertoo hiukkasen optiset ominaisuudet suhteessa ympäröivään aineeseen, hiukkasen koko ja sen kohtaaman valon aallonpituus λ . Viimeksi mainitut ovat usein yhdistetty yhteiseksi dimensiottomaksi kokoparametriksi

$$\alpha = \frac{\pi D_p}{\lambda}. \quad (3)$$

Yhtälön 2 taitekertoimen imaginaariosan n_{Im} suuruus kertoo, kuinka voimakkaasti hiukkanen absorboi valoa aallonpituudella λ . Yhtälössä 3 D_p on pallomaisen hiukkasen halkaisija. α on siis hiukkasen kehän ja kentän aallonpituuden suhde. Mie-teoria selittää

valon sironnan kaikenkokoisille pallomaisille hiukkasille. Toisaalta teoriaa voidaan approksimoida hyvin pienien ja hyvin suurien hiukkasten tapauksessa. Sironna voidaan näin jakaa kokoparametrin mukaan kolmeen osaan:

$\alpha \ll 1$ Rayleigh sironna: hiukkanen huomattavasti aallonpituutta pienempi

$\alpha \sim 1$ Mie-sironna: hiukkanen samaa kokoluokkaa aallonpituuden kanssa

$\alpha \gg 1$ Geometrinen sironna: hiukkanen huomattavasti aallonpituutta suurempi

Näkyvän valon ja lähi-infrapun aallonpituuksilla Rayleigh-sirottajina toimivat atomit ja molekyylit, kun taas Mie-sironnasta vastaavat ilmakehän aerosolit. Geometrisen sironnan alueella hiukkasten kuten jääkiteiden, vesipisaroiden ja pölyhiukkasten halkaisijat ovat useita mikrometrejä ja sironnan voimakkuus riippuu voimakkaasti niiden muodosta ja asennosta. Mie-teorian oletukset eivät näin enää ole voimassa. Geometrasta sironnassa hiukkaset sirottavat kaikkia näkyvän valon ja infrapun aallonpituuksia. Sitä kutsutaan siksi myös valikoimattomaksi tai ei-selektiiviseksi sironnaksi.

Hiukkasen sirottama ja absorboima teho P_{sir} ja P_{abs} ovat verrannollisia pinnalle saapuvaan irradianssiin \tilde{I}_0

$$P_{sir} = \sigma_{sir} \tilde{I}_0 \text{ ja } P_{abs} = \sigma_{abs} \tilde{I}_0, \quad (4)$$

missä σ_{sir} ja σ_{abs} ovat hiukkasen sironnan ja absorption vuorovaikutusalat. Vuorovaikutusalan ja yksittäisen hiukkasen poikkileikkauksen alan suhdetta kutsutaan kyseisen prosessin tehokkuudeksi Q . Vaimennustehokkuus on sironna- ja absorptio tehokkuuden summa:

$$Q_{vaim} = \frac{4\sigma_{vaim}}{\pi D_p^2} = Q_{sir} + Q_{abs}. \quad (5)$$

Mie-teorian pohjalta voidaan johtaa tarkat lausekkeet Q_{sir} ja Q_{abs} – arvoille, mutta seuraavassa tyydytään esittämään niiden aallonpituus- ja hiukkasen kokoriippuvuudet.

$$\begin{aligned} \text{Rayleigh-sironna:} \quad & Q_{sir} \propto \alpha^4 \propto D_p^4 \lambda^{-4} \\ & Q_{abs} \propto \alpha \propto D_p^1 \lambda^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

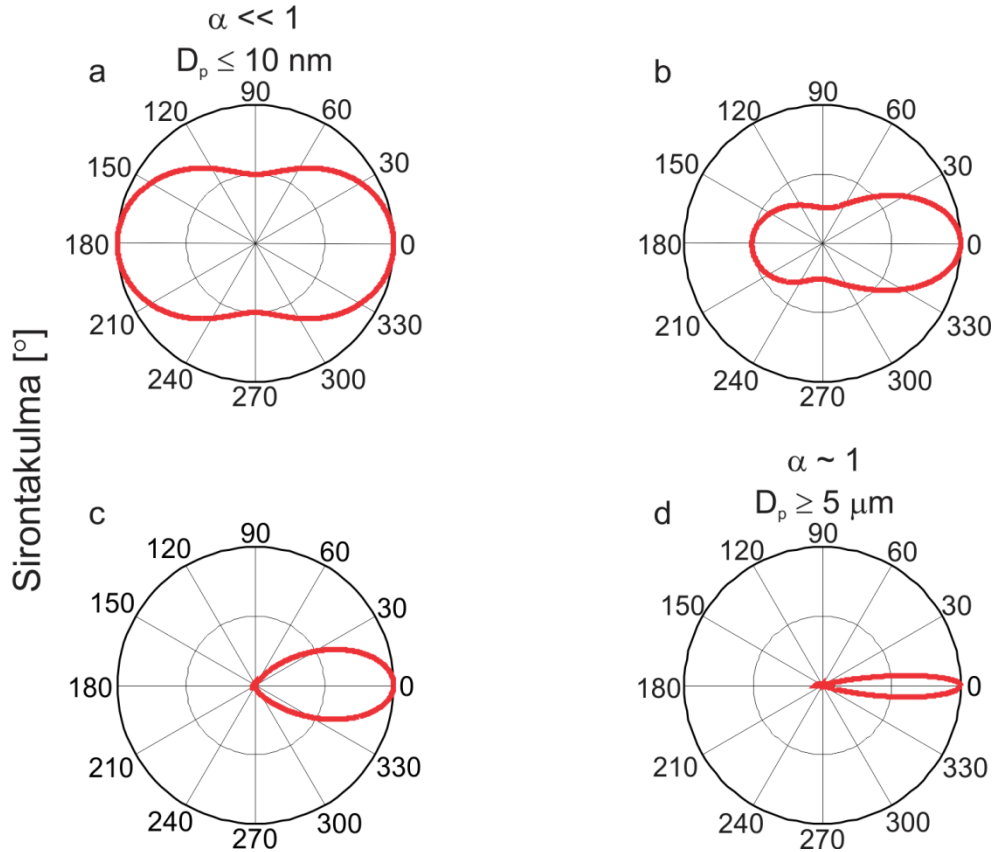
$$\begin{aligned} \text{Geometrinen sironna:} \quad & Q_{sir} \propto \alpha \propto D_p^1 \lambda^{-1} \\ & Q_{abs} \propto \alpha^0 \end{aligned}$$

Mie-sironnan voimakkuuden aallonpituusriippuvuus vaihtelee siis välillä λ^{-4} ja λ^{-1} hiukkasten suurentuessa atomaarisesta mittakaavasta useiden mikrometrien kokoihin klustereihin. Mie-teorian mukainen absorptio on aerosoleilla vähäistä.

Paitsi voimakkuus, myös sironnan kulmariippuvuus on erilainen erikokoisille hiukkasille. Differentiaalista sironnan vuorovaikutusala merkitään $d\sigma_{sir}/d\Omega$. Sen fysikaalinen tulkinta on hiukkaseen kohdistuneelle irradianssille tiettyyn suuntaan sironneen valon määrä avaruuskulmayksikköä kohden. Normitettua sironnakaaviota, joka kuvaa sironnan kulmariippuvuutta kutsutaan vaihefunktioksi p_Ω ja se on määritelty seuraavasti

$$p_{\Omega} = \frac{1}{\sigma_{sir}} \frac{d\sigma_{sir}}{d\Omega} , \quad \int_{4\pi} p_{\Omega} d\Omega = 1 . \quad (7)$$

Kuvissa 1 a-d on esitetty sironnan vaihefunktiot erikokoisille hiukkasille aallonpituudella 1538 nm. Kuvasta 3.2 a nähdään Rayleigh-sironnan olevan symmetristä eteen ja taaksepäin, kun taas puhdas Mie-sironta kuvassa 3.2 d on voimakkaasti eteenpäin suuntautunutta. Ilmakehässä sironnan voimakkuuteen vaikuttavat myös paine, lämpötila ja ilmankosteus.



Kuva 3.2 Periaatekuvat sironneen kentän suunnasta saapuvan säteen tasossa. Hiukkaskoko kasvaa mentäessä kuvasta a kuvaan d. Kuvaajat ovat huippunormitettuja, jolloin sironnan voimakkuudet eivät kuvissa a-d ole keskenään vertailukelpoisia.

Kun hiukkasia on suuri määrä, käsittelyn yksinkertaistamiseksi voidaan olettaa, että moninkertaista sirontaa ei tapahdu ja että yksittäinen siroamis- tai absorptiotapahtuma on riippumaton muista tapahtumista. Tällainen tilanne vallitsee silloin, kun hiukkasten välimatka on suuri verrattuna niiden kokoon. Sironnut intensiteetti on tällöin yksittäisistä hiukkasista sironneiden intensiteettien summa. Spektriseksi vaimennuskertoimeksi kutsutaan sironnan ja absorptio vaikutusalojen summan ja hiukkaskonsentraation N [m^{-3}] tuloa

$$\kappa_{vaim} = \sigma_{vaim} N = \frac{\pi D_p^2}{4} Q_{vaim} N. \quad (8)$$

Yhtälön 5 perusteella vaimennuskerroin voidaan jakaa absorboivaan ja sirottavaan komponenttiinsa, jotka voidaan edelleen jakaa Rayleigh- ja Mie-komponentteihinsa:

$$\kappa_{vaim} = \kappa_{sir} + \kappa_{abs} = (\kappa_{sir}^{kaasu} + \kappa_{sir}^{hiuk}) + (\kappa_{abs}^{kaasu} + \kappa_{abs}^{hiuk}). \quad (9)$$

Ilmakehässä sirottajina toimivat useat eri hiukkaset, jolloin edellä vallitsevien oletusten ja yhtälön 8 nojalla voidaan kirjoittaa

$$\kappa_{sir} = \sum_i \sigma_{sir}^i N_i(R) \text{ ja } \kappa_{abs} = \sum_i \sigma_{abs}^i N_i(R). \quad (10)$$

Yhtälöissä 10 summaus tapahtuu kaikkien etäisyydellä R olevien eri hiukkasten yli. Säteilyn edetessä differentiaalisen matkan dr sirottavassa ja absorboivassa väliaineessa intensiteetti I pienenee $\kappa_{vaim} dr I$ verran. Väliaineen ollessa epähomogeenista kuten ilmakehässä pystysuoraan kuljettaessa, vaimennuskerroin on myös paikkariippuvainen. Tällöin saadaan esitys intensiteetille matkan R jälkeen

$$I(R) = I(0) \exp\left(-\int_0^R \kappa_{vaim}(\lambda, r) dr\right). \quad (11)$$

Tuloa $\kappa_{vaim} dr$ kutsutaan optiseksi paksuudeksi ja yhtälö 11 on Beer-Lambertin laki, joka ottaa huomioon myös sironnan intensiteetin vaimentajana. [6,39]

3.2 LIDAR-yhtälö

LIDAR-yhtälö on LIDAR-suunnittelun yleisimpiä työkaluja. Se liittää keräysoptiikan vastaanottaman tehon lähetettyyn lasertehoon. Yhtälö ottaa huomioon ilmakehän koostumuksen, vuorovaikutuksen sähkökentän ja ilmakehän hiukkasten välillä ja fotonien keräämisen todennäköisyyden. Yhtälö huomioi myös laitteiston linssien ja suotimien läpäisy- ja peilien heijastuskertoimet, vastaanottimen geometrian sekä detektorin kvantitatiivisuhteen. LIDAR-yhtälön suppea muoto voidaan kirjoittaa seuraavasti:

$$P_{sig}(\lambda, R) = \underbrace{P_L(\lambda)}_{\substack{\text{lähetetty} \\ \text{teho}}} \left[\overbrace{\beta(\lambda, R) \Delta R \frac{A}{R^2}}^{\text{sironta}} \right] \underbrace{[T(\lambda, R)]^2}_{\substack{\text{ilmakehän} \\ \text{läpäisy}}} \underbrace{\widetilde{\eta(\lambda)}}_{\substack{\text{optiset} \\ \text{osat}}} \underbrace{G(R)}_{\text{geometria}} + \underbrace{P_{tausta}}_{\text{tausta-signaali}}. \quad (12)$$

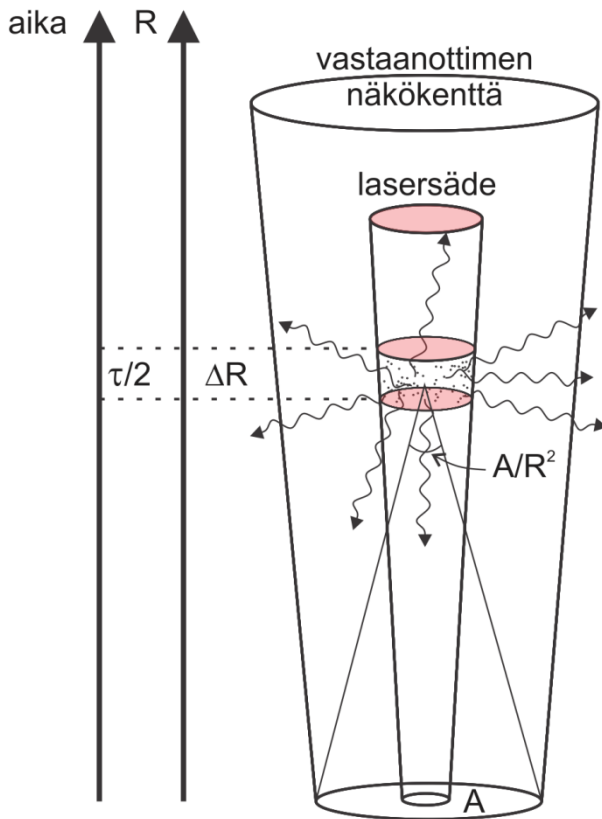
Yhtälössä P_{sig} on vastaanotettu ja P_L lähetetty optinen teho ja P_{tausta} kuvaa laitteistolle saapuvia fotoneja, jotka eivät ole peräisin lasersäteestä. β on tilavuussirontakerroin, ΔR matka, jolta sirontaa mitataan, A vastaanottimen tuloaukon pinta-ala, R mittaustilavuuden etäisyys laitteistoon ja T ilmakehän läpäisykerroin eli transmittanssi laserin aallonpituudella. Lisäksi yhtälössä 12 η on LIDAR-laitteiston optinen hyötysuhde, joka huo-

mioi kaikki laitteiston optisissa komponenteissa tapahtuvat signaalin heikkenemiset ja G on geometrinen kerroin tai G -tekijä, joka koskee suurimmaksi osaksi LIDAR-laitteiston lähettimen ja vastaanottimen näkökenttien päällekkäisyyttä [39-41]. Monostaattisella LIDARilla, jossa lähetys ja vastaanotto ovat yhteisellä optisella akselilla kuten kuvassa 3.3, G lähestyy arvoa yksi havaintomatkan pidetessä.

Tarkastellaan LIDAR-yhtälön sironta- ja transmissiokertoimia lähemmin. Merkitään elastisen tai kvasi-elastisen sironnan todennäköisyyttä $p(\lambda)$. Oletetaan lisäksi edellisessä kappaleessa mainittujen yksittäisen ja riippumattoman sironnan oletuksien olevan voimassa. Tilavuussirontakerroin β summaa jokaiselle mittaustilavuudessa olevalle hiukkaselle tulon, jonka tekijöinä ovat hiukkaskonsentraatio, $p(\lambda)$ ja sironnan vuoro-vaikutusala tiettyyn kulmaan:

$$\beta(\lambda, R) = \sum_i \frac{d\sigma_{sir}^i}{d\Omega} N_i(R) p_i(\lambda). \quad (13)$$

Tilavuusemissiokertoimen dimensio on $\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$. Tällöin LIDAR-yhtälössä oleva tulo $\beta\Delta R$, jossa ΔR on mittaustilavuuden pituus, on todennäköisyys, että mittaustilavuuteen saapunut fotoni siroaa tiettyyn avaruuskulmayksikköön. LIDAR-vastaanotin kerää valoa etäisyydeltä R avaruuskulmassa A/R^2 , jolloin todennäköisyys, että fotoni siroaa kohti LIDAR-vastaanottimen tuloaukkoa on $[\beta\Delta R \cdot A/R^2]$.



Kuva 3.3 Lähettimen ja vastaanottimen näkökentät, mittaustilavuus ja takaisinsirontaa keräävä avaruuskulma. τ on laserpulssin ajallinen pituus.

Ilmakehän transmissio saadaan yhtälöstä 11 jakamalla molemmat puolet alkuperäisellä intensiteetillä $I(0)$. LIDAR-signaali kulkee edestakaisen matkan, jolloin transmissiotermi LIDAR-yhtälössä on

$$[T(\lambda, R)]^2 = \exp\left(-2 \int_0^R \kappa_{vaim}(\lambda, r) dr\right), \quad (14)$$

jossa sironneen valon taajuuden on oletettu olevan hyvin lähellä LIDAR-laitteen laserin aallonpituutta. [6,14,42-44]

3.3 Tuulen aiheuttama Doppler-siirtymä

Kun periodisten aaltojen lähde ja havaitsija ovat liikkeessä suhteessa väliaineeseen, jossa aallot etenevät, havaitsijan mittaama aaltoliikkeen taajuus poikkeaa lähteen lähettämästä taajuudesta. Ilmiötä kutsutaan Doppler-ilmiöksi itävaltalaisen fyysikon Christian Dopplerin mukaan ja se on ominaista kaikelle aaltoliikkeelle. Kuvan 3.4 a merkisääntöjä noudattaen detektorin mittaama taajuus voidaan laskea seuraavasti:

$$\nu' = \frac{V_{aalto} - V_H}{V_{aalto} - V_L} \nu_0. \quad (15)$$

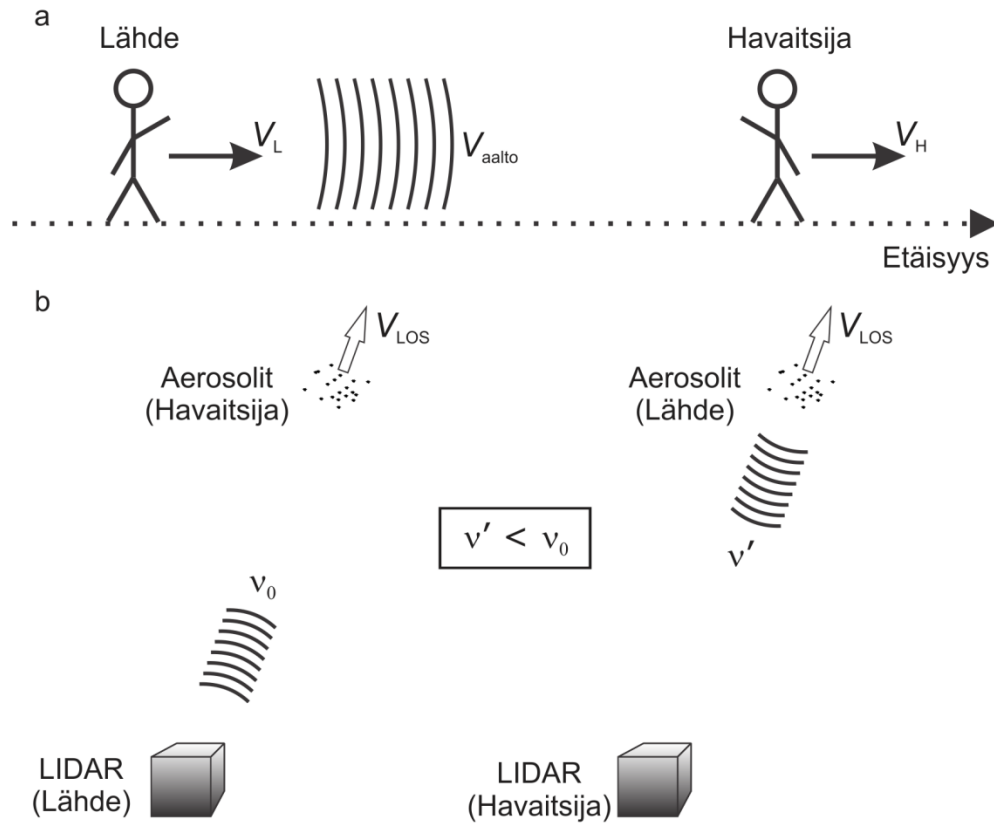
Kaavassa 15 ν_0 ja ν' ovat lähteen lähettämä ja havaitsijan mittaama taajuus ja V_{aalto} on aaltoliikkeen etenemisnopeus. LIDAR-sovelluksessa laserin valoa sirottava hiukkanen on havainnoitsija valon kulkiessa pois päin LIDAR-laitteesta ja lähde, kun valo siroaa hiukkasesta takaisin kohti vastaanotinta kuten kuvassa 3.4 b esitetään. LIDAR-mittauksessa mittalaite on paikoillaan ja valoa sirottava hiukkasjoukko on kollektiivisessä liikkeessä johtuen ilmakerroksessa vallitsevasta tuulesta. Doppler-ilmiön käsittely sähkömagneettiselle säteilylle tulisi olla relativistinen. Koska hiukkasten nopeudet ilmakehässä ovat hyvin paljon valon nopeutta c pienempiä, taajuussiirtymän suuruutta voidaan kuitenkin approksimoida yhtälön 15 ja kuvan 3.4 merkintöjen avulla:

$$\Delta\nu_{Doppler} = \left(\frac{c - V_{LOS}}{c + V_{LOS}}\right) \nu_0 - \nu_0 \cong -\frac{2V_{LOS}}{\lambda}. \quad (16)$$

Kuvassa 3.4 ja yhtälössä 16 V_{LOS} on ilmakehän hiukkasten nopeus lasersäteen suunnassa eli Line-Of-Sight (LOS) –nopeus, joka saadaan tuulivektorin skalaariprojektioista kentän aaltovektorille. Projektio voidaan laskea kentän normeeratun aaltovektorin ja kolmiulotteisen tuulivektorin pistetulona

$$V_{LOS} = \hat{\underline{k}} \cdot \underline{V}_{tuuli} = \|\underline{V}_{tuuli}\| \cos(\hat{\underline{k}}, \underline{V}_{tuuli}). \quad (17)$$

Tuulivektorin eli mittaustilavuudessa vallitsevan tuulen suunnan ja suuruuden määrittämiseksi V_{LOS} tulee määrittää vähintään kolmeen toisistaan hieman poikkeavaan suuntaan. Jokaiselle vektorin alkioille voidaan näin johtaa parametrisitys yhtälöstä 17. [45,46]



Kuva 3.4 Doppler-ilmion ja kaavan 15 havainnollistaminen.

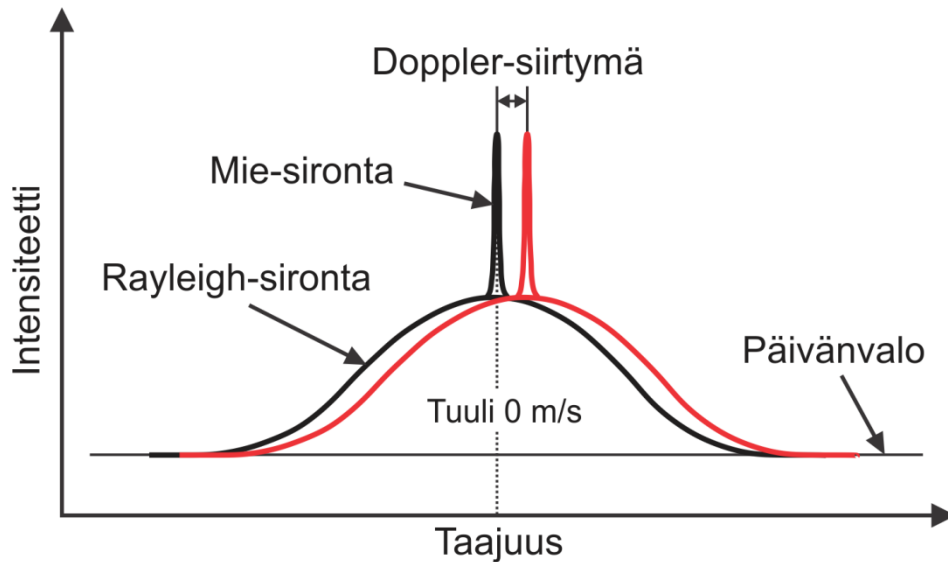
- a) Nopeudet yhtälössä 15 ovat positiivisia, kun lähde ja havaitsija liikkuvat samaan suuntaan.
 b) LIDAR-mittauksessa LIDAR on sekä lähde että havaitsija.

Kollektiivisen liikkeen lisäksi ilmakehän molekyylit ja aerosolihiukkaset ovat myös jatkuvassa lämpöliikkeessä. Niiden liiketila laboratoriokoordinaatistoon nähden on täten kollektiivisen nopeuden ja lämpöliikkeestä johtuvan nopeuden summa. Toisin kuin tuuli, lämpöliike ei ole vektorisuure, vaan hiukkasten suunta on satunnainen. Doppler-ilmion johdosta sironneen valon taajuusjakauma havaitaan tällöin leveämmäksi kuin lähettimen laserin taajuusjakauma. Tällaista spektriviivan muotofunktion eli viivaprofiilin levenemistä kutsutaan Doppler-levenemiseksi. Ilmakehässä vallitsevilla paineilla hiukkasten lämpöliikkeestä aiheutuva nopeus noudattaa Maxwellin nopeusjakaumaa. Tällöin hiukkasten keskimääräinen nopeus on kääntäen verrannollinen hiukkasen massan neliöjuureen ja sironneen valon viivaprofiilin puoliarvonleveys saadaan lausekkeesta

$$\Delta v_{1/2}^{Doppler} = \frac{2\sqrt{\ln 2}}{c} \sqrt{\frac{2k\tilde{T}}{m}} (v + \Delta v_{Doppler}). \quad (18)$$

Yhtälössä 18 k on Boltzmannin vakio, \tilde{T} lämpötila ja m hiukkasen massa. Johtuen kaasun molekyyliden ja aerosolien suuresta kokoerosta aerosolien lämpöliike on paljon molekyylejä hitaampaa. Ilmakehässä se on Brownin liikkeestä johtuvan diffuusionopeuden ja painovoimasta johtuvan ajautumisnopeuden suuruusluokkaa. Periaatekuvassa 3.5 on

esitetty tyypillinen LIDAR-laitteen vastaanottaman sirontasignaalin spektri kahdella eri tuulen nopeudella. Mustalla piirretyssä profiilissa tuulella ei ole suuntakomponenttia lasersäteen suunnassa. Punaisen spektrin tapauksessa tuulella on huomattava tuulikomponentti LIDAR-laitetta kohti. Kuva havainnollistaa Doppler-siirtymän suhteellisen suuruuden verrattuna aerosoli- ja molekyylisirontaspektrien leveyksiin.



Kuva 3.5 Mie- eli aerosolisironnan ja Rayleigh- eli molekyylisironnan sirontaprofiilit sekä Doppler-siirtymän suhteellinen suuruus.

Kuvasta voidaan todeta Doppler-siirtymän olevan tyypillisillä tuulen nopeuksilla huomattavasti pienempää kuin molekyylisironnan Doppler-levenemän puoliarvonleveys. Aerosoleilla sirontaspektrin leveys riippuu valonlähteen viivanleveydestä, joka taas voidaan valita Doppler-siirtymää pienemmäksi. Käytetyn laserin aallonpituudesta riippuu kumpi kuvassa 3.5 olevista profiileista, leveä molekyyli- vai kapea aerosoliprofiili, hallitsee sirontaspektrissä. Näkyvän ja UV-valon taajuuksilla molekyylisironta on aerosolisirontaa huomattavampaa kaavan 6 mukaisesti. Päinvastainen tilanne on infrapuna-aallonpituuksilla. [39,45,47,48]

4 Detektiomenetelmät

Kaikissa LIDAR-laitteistoissa yhteistä on laservalon ilmakehään lähettäminen ja takaisinsironneen valon kerääminen. Eri menetelmät eroavat kuitenkin tavassa, jolla informaatio Doppler-siirtymästä tuotetaan sironneesta valosta. Perinteinen ja yleisimmin käytössä oleva tapa on nimeltään heterodyyni-detektio. Siinä ohjataan ilmakehästä tuleva säde toisen säteen, jota nimitetään paikallisoskillaattorisäteeksi, päälle ja selvitetään Doppler-siirtymän suuruus tarkkailemalla syntynyttä huojuntailmiötä. Säteiden tulee olla sekä avaruudellisesti että ajallisesti koherentteja, jonka vuoksi heterodyyni-detektiota kutsutaan myös koherentiksi detektioksi. LIDAR on tällä hetkellä käytössä ilmakehämittauksissa, jotka ulottuvat troposfääristä mesosfääriin. Alemmassa troposfäärissä, jossa aerosolipitoisuus on korkea, lähi-infrapun aallonpituutta käyttävä koherentin detektion LIDAR suoriutuu parhaiten. Heterodyyni-detektio ei kuitenkaan pysty hyödyntämään molekyylistä sironnutta valoa tuulennopeuden määrittämisessä. Tämä johtuu molekyylisironnan voimakkaasta Doppler-levenemisestä. Heterodyyni-detektio ei täten sovellu ilmakehän kerrosten, joissa aerosolikonsentraatio on vähäinen, havainnointiin. Meri- ja napa-alueilla aerosolipitoisuus jopa troposfäärissä voi olla liian pieni koherenttiin detektioon. Tällöin mittausdatan saamiseksi tulee käyttää sirontaa ilmakehän molekyyleistä eli Rayleigh-sirontaa ja Doppler-siirtymä selvitetään interferometriä tai optisia suotimia hyväksikäyttämällä. Menetelmää kutsutaan suoraksi detektioksi tai heterodyyni-detektioon yhdenmukaistettavasti epäkoherentiksi detektioksi, mikä voi olla harhaanjohtavaa varsinkin interferometreihin perustuvien tekniikoiden yhteydessä. Se voi käyttää Rayleigh-takaisinsirontaa näkyvän ja UV-valon alueilla, mutta myös Mie-sirontaa lähi-infrapun aallonpituusalueella. Tämän diplomityön aikana tutustuttiin sekä heterodyyni- että suoran detektion menetelmiin. Työn kokeellinen LIDAR-laitteisto rakennettiin heterodyyni-detektiolla toimivaksi. Kappaleissa 4.2 – 4.4 selvitetään tekniikoiden toimintaperiaatteet ja luokittelu alaryhmiin sekä pohditaan eri menetelmien eroavaisuuksia. Luvussa on myös lyhyt vertailu tämänhetkisistä kaupallisista tuuli-LIDAREista. Viimeiseksi esitellään mahdollisia LIDAR-mittausta haittaavia ympäristötekijöitä. Ensin kuitenkin esitetään lyhyesti käsitteet, jotka liittyvät LIDAR-laitteistossa syntyvän kohinan suuruuteen ja sen lähteisiin. Ne ovat tärkeitä laitteiston toiminnan ymmärtämiseksi ja eri detektiomenetelmien vertailemiseksi. Seuraavassa kappaleessa esitellään myös miten lasersäteen ominaisuudet voivat vaikuttaa kerätyn sirontatehon suuruuteen. [14,48]

4.1 Kohina LIDAR-laitteistossa

Kohina koostuu satunnaisista elektromagneettisista kentistä, jotka osuvat samalle spektriselle alueelle mitattavan signaalin kanssa. Kohinan alkuperää voidaan tarkastella monella eri tavalla kuten tilastollisena ilmiönä, kvanttimekaniikan pohjalta tai intuitiivisesti yksinkertaisten sähköpiirien avulla. Ainoastaan laitteiston komponenteista ja ympäristön vaikutuksista johtuvaa kohinaa voidaan pienentää rajatta. Tässä kappaleessa käydään lyhyesti läpi signaali-kohinasuhteen arviointi ja kohinan lajit, jotka tulee ottaa huomioon LIDAR-laitteiston suunnittelussa. Näitä ovat detektorin raekohina, lämpö- eli Johnsonin kohina, kuituvahvistimen spontaanista emissiosta johtuva kohina ja laserin intensiteetti- ja vaihekohina.

Raekohina (engl. shot noise) on nykyteorian mukaan valokentässä itsessään olevaa intensiteettivaihtelua eikä näin liity pelkästään valon havainnoimiseen valodetektoreilla. Se johtuu valon rakeisuudesta eli aalto-hiukkasdualismin mukaisesta hiukkasluonteesta. Raekohinan suuruus voidaanakin johtaa olettamalla sen olevan seurausta diskreettien varaustenkuljettajien satunnaisesta muodostumisesta valodetektorissa tai vaihtoehtoisesti yksittäisten fotonien törmäämisestä eri ajanhetkillä detektoriin. Molemmat lähestymistavat johtavat samaan tulokseen. Varaustenkuljettajien syntyminen ja fotonien törmääminen noudattavat Poissonin jakaumaa. Tämä satunnaisuus aikaansaa detektorin ulostulovirtaan vaihtelua, jonka neliön keskiarvo signaalin taajuusvälillä $\Delta\nu_{sig}$ ja keskimääräisellä detektorin virralla $\langle i_{sig} \rangle$ on

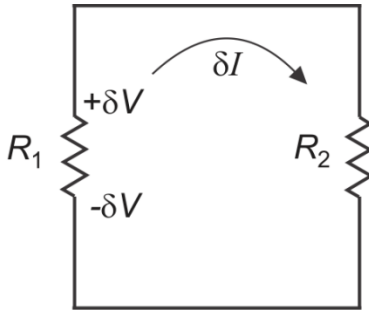
$$\langle i_{SN}^2(\nu) \rangle = 2e\langle i_{sig} \rangle \Delta\nu_{sig}, \quad (19)$$

missä e on alkeisvaraus. Detektion sanotaan toimivan kvanttikohinarajalla silloin, kun raekohina on merkittävin kohinan lähde. Detektion herkkyys vastaa tällöin Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen sallimaa arvoa. [49,50]

Varaustenkuljettajien lämpöliike saa johteessa aikaan paikallisia varausepätasapainoja. Resistiivisissä komponenteissa värähtelevät varausgradientit indusoivat vaihtojännitteen komponentin yli. Termisesti indusoitunut jännite aiheuttaa virran ja täten tehon siirtymän toiseen resistiiviseen komponenttiin, joka on kytketty ensimmäisen resistanssin rinnalle kuvan 4.1 mukaisesti. Mekanismia kutsutaan lämpö-, Johnsonin tai Nyqvistin kohinaksi ja se on läsnä virtapiireissä ilman ulkoista jännitettäkin. Johnsonin kohinan aiheuttaman virran neliön keskiarvo detektorissa, jonka ulostulon impedanssi on Z saa huoneenlämpötilassa esityksen

$$\langle i_J^2 \rangle = \frac{4k\tilde{T}\Delta\nu_{sig}}{Z}. \quad (20)$$

Edellä kuvattu päättelyketju antaa kuvan lämpökohinan vaikutuksesta. Toisaalta yhtälö 20 voidaan johtaa tilastollisesti tarkastelemalla varaustenkuljettajien peräkkäisiä törmäyksiä johdinaineen hilan elektroneihin, ioneihin ja fononeihin. Yhtälössä 20 on kohinavirran taajuusriippuvuus jätetty merkitsemättä, sillä lämpökohina on tavallisesti valkoista eli yhtä voimakasta taajuudesta riippumatta. [49]



Kuva 4.1 Lämpöliikkeen indusoima jännite $2\delta V$ resistanssin R_1 yli aiheuttaa virran oikeanpuoleiseen johtimeen. Kuvassa vaakasuoraan kulkevat johteet ajatellaan häviöttömiksi.

Eri LIDAR-detektiomenetelmien soveltuvuutta tarkastellessa mallinnetaan usein niiden signaali-kohina – suhdetta SNR (engl. Signal to Noise Ratio). Koska teho on verrannollinen virran neliöön, signaali- ja kohinatehon suhde saadaan yhtälöstä

$$\text{SNR} = \frac{\langle i_{sig}^2(v) \rangle}{\langle i_{SN}^2(v) \rangle + \langle i_j^2(v) \rangle}, \quad (21)$$

missä $i_{sig}^2(v)$ on signaalin aiheuttama virta detektorin ulostulossa. Valomonistinputkissa yhtälön 21 nimittäjään lisätään vielä välianodeista eli dynodeista johtuva kohinatermi. Dynodikohina on tavallisesti pientä ja sillä harvoin on käytännön merkitystä. [49]

Detektorin kohinan lisäksi laserkaviteetista ulostuleva teho vaihtelee jatkuvasti. Kohinan merkittävimpiä myötävaikuttajia ovat tavallisesti ulkoiset lähteet kuten akustiset ja laserin alustan värähtelyt tai kaviteetin lämpötilan pieni vaihtelu. Suhteellinen intensiteettikohina RIN (engl. Relative Intensity Noise) on suhteellinen kohinateho yhden hertsin levyisessä taajuuskaistassa

$$\text{RIN} \equiv \frac{S(v)}{P_{laser}^2} \cdot 1\text{Hz}, \quad (22)$$

missä $S(v)$ on spektrinen kohinatehon tiheysfunktio ja P_{laser} on laserin keskimääräinen optinen teho. Yksimuotoisen puolijohdelaserin RIN on tietoliikennetaajuusalueilla 0.1-10 GHz tyypillisesti suuruusluokkaa -160 dB eli 10^{-16} . Detektiopiirissä, jonka elektrooniikan kaistanleveys on Δv_{sig} , RIN-tehonvaihteluiden aiheuttaman virran neliön keskiarvo saadaan yhtälöstä 23:

$$\langle i_{RIN}^2 \rangle = \left(\frac{e\eta_{det}}{h\nu} \right)^2 (\text{RIN}) P_{laser}^2 \Delta v_{sig}. \quad (23)$$

Yhtälössä 23 η_{det} on detektorin kvanttihiyötysuhde eli todennäköisyys, että detektorille osunut foton saa aikaan havaitun varauksenkuljettajan syntymisen ja h Planckin vakio. [49,51]

Vaikka kaikki ulkoiset vaikutukset suljettaisiin pois, jäljelle jäisi silti kaviteetissa tapahtuvasta spontaanista emissiosta johtuva kvanttimekaaninen kohina. Populaatioinversion kasvaessa laserkaviteetin aktiivisessa aineessa, myös spontaanin emission todennäköisyys kasvaa. Vaikka spontaanisti emittoituvan fotonin liikesuunta on satunnainen, osa säteilystä kulkee lähes samaan suuntaan kuin stimuloidun emission fotonit. Tämä kenttä voimistuu stimuloidun emission kautta ja sekoittuu kaviteetin alkuperäi-

seen kenttään. Laserin ulostulossa osa säteilyn tehosta on siis peräisin spontaanista emissiosta, joka on samantaajuista, mutta epäkoherenttia stimuloidun emission kentän kanssa. Spontaanin emission aiheuttama vaikutus voidaan täten jakaa amplitudi- ja vaihekohinaan. Näistä ensimmäinen ei aiheuta suurta häiriötä laserkaviteetissa, jossa amplitudikohinaa voidaan supistaa saturoituvalla vahvistinaineella. Päinvastainen tilanne on kuituvahvistimissa, jossa vahvistunut spontaani emissio ASE (engl. Amplified Spontaneous Emission) on suurin yksittäinen kohinalähde ja vaikuttaa täten eniten signaali-kohinasuhteeseen. Vaihekohina on lasereissa amplitudikohinaa merkittävämpi ilmiö. Sen alkuperä on satunnaisessa vaihe-erossa stimuloidun ja spontaanin emission kenttien välillä ja se on vastuussa laserin kentän taajuuden poikkeamisesta ideaalisesta monokromaattisesta kentästä. Vaihekohinan rajoittamaa laserin viivanleveyttä kutsutaan Schawlow-Townes –viivanleveydeksi lasertekniikan kehittäjien mukaan. Se on kaviteettikohtainen ja riippuu kaviteetin hyvyysluvusta eli Q-kertoimesta (engl. Quality factor), laserin tehosta, taajuudesta ja populaatioinversion voimakkuudesta. Käytännön olosuhteissa laserin viivanleveys on ulkoisten tekijöiden vaikutuksesta huomattavasti Schawlow-Townes –viivanleveyttä suurempi. [49]

Hyvin koherentin valon käyttäminen LIDAR-laitteistossa aiheuttaa vastaanottimella täpliintymis-ilmiön (engl. speckle). Sen aiheuttamat ongelmat ovat huomattavasti helpommin voitettavissa suorassa kuin heterodyyni-detektiossa. Täpliintymisen perusteellinen kuvaus löytyy kaukokenttä- eli Fraunhoferin diffraktiota käsittelevistä teoksista, mutta seuraavassa annetaan lyhyt kuvaus ilmiön alkuperästä. Mittaustilavuudessa olevat aerosolihiukkaset ovat toisistaan satunnaisten etäisyyksien päässä. Detektorille saapuvan valon vaihe on täten osoitinsumma yksittäisistä hiukkasista sironneista kentistä. Vastaanottimella konstruktiiivinen ja destruktiivinen interferenssi saa aikaan satunnaisten irradianssikuvion, joka koostuu kirkkaista ja tummista täplistä. Tehokas paikallisoskillaattori ja signaalisäteiden sekoittuminen onnistuu vain koherenssialueilla eli alueilla, joissa vaihe pysyy vakiona. Täpliintyminen siis heikentää signaalien sekoitusastetta, sillä vastaanottimen tuloaukosta on tehokkaassa käytössä vain murto-osa. Suorassa detektiossa täpliintyminen voidaan kiertää muun muassa ajallisella keskiarvostuksella, leventämällä käytetyn valon viivanleveyttä tai suurentamalla vastaanottimen kokoa ja integroimalla signaalia kaikkien täpläkuvioiden yli. Mikään edellä mainituista keinoista ei kuitenkaan paranna heterodyyni-detektion signaali-kohinasuhdetta. Suurempi detektorin aukko heikentäisi säteiden päällekkäisyyttä ja kuitukytketyssä LIDARissa säteet yhdistetäänkin useasti yksimuotokuituun, jonka ytimen halkaisija on tyypillisesti vain 10 μm . Täpliintymisen vuoksi monostaattisessa LIDAR-laitteistossa, jossa lähtevä lasersäde on ympyräsymmetrisesti Gaussimainen, vastaanotinoptiikan keräämästä valosta voidaan yhdistää yksimuotokuituun maksimissaan vain noin 42 % [52]. [43,52,53]

4.2 Heterodyyni-detektio

Hetero- ja homodyyni-detektiolla tarkoitetaan informaation sisältävän signaalin sekoittamista paikallisoskillaattori- eli LO-signaaliin (engl. Local Oscillator). Sen historia radioaaltovastaanottimissa ulottuu viime vuosisadan alkuun ja optisten signaalien havainnoimiseen sitä käytettiin ensimmäisen kerran vuonna 1955 [54]. Tuuli-LIDAR-sovelluksiin sitä on käytetty 60-luvulta lähtien. Heterodyyni-detektion heikkous on sen signaalin voimakas riippuvuus ilman aerosolikonsentraatiosta. Sillä on mitattu tuulen nopeuksia jopa 30 km päästä, mutta tällöin säteen korkeuskulman tulee olla pieni. Pystysuoraan heterodyyni-detektiolla voidaan mitata noin 4-10 km asti ilmakehän hetkellisestä koostumuksesta riippuen. [53]

Kahden kentän sekoittaminen johtaa hyvin tunnettuun huojuuntailmiöön, jonka avulla satojen terahertsien taajuisista optisista signaaleista saadaan selvitettyä radiotaajuuksinen Doppler-siirtymä. Heterodyyni-LIDARissa sekoittaminen tapahtuu ohjaamalla LO-lasersäde ja ilmakehästä sironnut signaali mahdollisimman täydellisesti päällekkäin. Huojuntasignaali on sitä voimakkaampi mitä parempi on niiden avaruudellinen peittyminen. Optimaalinen tilanne on silloin kun säteet miehittävät yhteisen polarisaatiotilan samat poikittaiset muodot. Tällainen tilanne saadaan aikaiseksi ohjaamalla säteet samaan polarisaation pitävään yksimuotokuituun.

Tarkastellaan huojuuntasignaalin muodostumista detektorin ulostulossa tasoaaltoaproksimaation tapauksessa. Kuiduissa, jotka kuljettavat paikallisoskillaattori- ja ilmakehästä sironnutta sähkökenttää, voidaan kirjoittaa kulkevan ajalliset signaalit

$$E_{LO} = \text{Re}[A_{LO} \exp(i\omega_{LO}t + i\varphi_{LO})] \text{ ja } E_{sig} = \text{Re}[A_{sig} \exp(i\omega_{sig}t + i\varphi_{sig})]. \quad (24)$$

Signaalikulmataajuus ω_{sig} yhtälössä 24 on LO-taajuuden ω_{LO} , sironnasta aiheutuvan Doppler-siirtymän $2\pi\Delta\nu_{Doppler}$ ja taajuuden poikkeutuksen $2\pi\Delta\nu_{AOM}$ summa

$$\omega_{sig} = \omega_{LO} + 2\pi(\Delta\nu_{Doppler} + \Delta\nu_{AOM}). \quad (25)$$

Taajuutta siis poikkeutetaan hieman LO-taajuudesta ennen lähetinoptiikalle ohjausta. Poikkeutus voidaan tehdä erillisellä taajuussiirtimellä, mutta useimmiten se toteutetaan akusto-optisella modulaattorilla (AOM). Kentät yhdistetään samaan yksimuotokuituun, jolloin kuidussa kulkeva signaali on kenttien summa. Detektorin fotovirta on siis verrannollinen detektorille tulevaan kokonaisintensiteettiin ja täten kokonaiskentän amplitudin itseisarvon neliöön

$$\begin{aligned} i_{sig}(t) \propto |E_{LO} + E_{sig}|^2 &= |E_{LO}|^2 + |E_{sig}|^2 \\ &+ A_{LO}A_{sig} \cos[i(\omega_{sig} - \omega_{LO})t + i(\varphi_{sig} - \varphi_{LO})] \\ &+ A_{LO}A_{sig} \cos[i(\omega_{sig} + \omega_{LO})t + i(\varphi_{sig} + \varphi_{LO})]. \end{aligned} \quad (26)$$

Yhtälön 26 viimeisen eli summataajuustermiä taajuus on liian suuri detektorin havaittavaksi. Tästä syystä se keskiarvostuu nolllaksi. Myös termi $|E_{sig}|^2$ voidaan jättää huomi-

oimatta yhtälössä 26, sillä signaalikentän teho on paljon paikallisoskillaattoritehoa pienempi. Virta koostuu tällöin vakiotermistä ja signaalien erotustaajuudella värähtelevästä, detektorilla helposti havaittavasta termistä. Erotustaajuus on kaavan 25 mukaan Doppler-siirtymän ja taajuuden poikkeutuksen summa. Optisen tehon ja detektorin ulostulovirran välinen verrannollisuuskerroin on erilainen eri detektorityypeillä. Valomonistinputkelle ja puolijohdedetektorille voidaan moduloimattoman signaalin tapauksessa kirjoittaa

$$i_{sig}(t) = \frac{P_{LO}e\eta_{det}}{h\nu_0} \left[1 + 2 \sqrt{\frac{P_{sig}}{P_{LO}}} \cos[2\pi(\Delta\nu_{Doppler} + \Delta\nu_{AOM})t] \right] + i_d, \quad (27)$$

missä P_{LO} ja P_{sig} ovat paikallisoskillaattori- ja signaalikenttien tehot, ν_0 paikallisoskillaattorisäteen taajuus ja i_d detektorin pimeävirta. Heterodyyni-detektion SNR on tällöin yhtälön 21 mukaan

$$\text{SNR}_{hd} \cong \frac{\tilde{G}^2 P_{sig} P_{LO} \left(\frac{e\eta_{det}}{h\nu_0} \right)^2}{\left[\tilde{G}^2 2e \left(i_d + \frac{P_{LO}e\eta_{det}}{h\nu_0} \right) + \frac{4k\tilde{T}}{Z} \right] \Delta\nu_{laser}}, \quad (28)$$

missä \tilde{G} on detektorin jälkeen olevan vahvistimen vahvistuskerroin. Heterodyyni-signaalin kaistanleveys on kaksi kertaa laserin spektrinen viivanleveys, kun oletetaan takaisinsiroavan signaalin vaiheen olevan riippumaton LO-säteen vaiheesta [49,55,56]. Johtuen äärellisen pituisesta etäisyyden erottelukyvystä ΔR , tuuli mittaustilavuuden sisällä ei kuitenkaan ole vakio. Signaalin kaistanleveys on tällöin hieman arvoa $2\Delta\nu_{laser}$ leveämpi. Levenemisen suuruus riippuu tuuligradientin voimakkuudesta säteen suunnassa. Yhtälöstä 28 nähdään, että SNR kasvaa LO-säteen tehoa kasvattamalla, kunnes paikallisoskillaattoritehoon verrannollinen termi nimittäjässä on hallitseva. Tällöin rae-kohina on voimakkaampaa kuin muut kohinalähteet ja detektio toimii kvanttikohinara-jalla. Voimakkaalla LO-säteellä voidaan näin havaita heikompia optisia signaaleita kuin suoralla detektiolla olisi mahdollista. Heterodyyni-detektio ikään kuin valikoivasti vahvistaa halutunataajuista signaalia ilman erillistä vahvistinta. [49]

Taajuuden poikkeutusta käyttävien LIDAR-sovellusten etu verrattuna laitteisiin, jotka eivät siirrä lähetetyn säteen taajuutta, käy ilmi kaavasta 27. Ilman poikkeutusta taajuuden $\Delta\nu_{Doppler}$ etumerkkiä ei voi tietää detektorin ulostulosta. Tällöin tuulen suunnan vektoriprojektiolla on kaksi mahdollista suuntaa, joiden välinen kulma on 180° . Valitsemalla poikkeutustaajuus mahdollisimman suureksi, jotta kaavassa 27 olevan kosinitermin argumentti ei tavallisissa käyttöolosuhteissa ole negatiivinen, tuulen suunta voidaan selvittää yksikäsitteisesti vertaamalla huojuntataajuutta poikkeutustaajuuteen.

LO- ja signaalisäde ovat tavallisesti lähtöisin samasta laserista. Kentän kykyyn interferoida itsensä kanssa liittyy koherenssin käsite. Laservalon yksi perustavanlaatui-

simmista eroista muiden valonlähteiden säteilyyn on sen suuri avaruudellisen koherenssin aste. Tällöin samalla ajanhetkellä kahden eri paikan välinen vaihe-ero on vakio eli paikkojen kenttien välillä on vahva riippuvuussuhde. Tämä ominaisuus on vastuussa laserin valon suuntautuvuudesta eli lasersäteistä. Heterodyyni-detektiossa LO-säteen tulee lisäksi oskilloida tarkasti samalla taajuudella ajanhetkestä riippumatta, jolloin samassa pisteessä eri ajanhetkillä mitatuilla sähkökentillä on vahva riippuvuussuhde. Tätä kutsutaan ajalliseksi koherenssiksi. Ajallinen koherenssi liittyy laserin viivanleveyteen yhtälön 29 kautta

$$\Delta v_{laser} = \frac{1}{\pi \tau_c}, \quad (29)$$

missä τ_c on koherenssiaika eli ajankesto jolloin voimme luottaa laserin sinimuotoisella oskilloinnilla olevan tarkkaan määritetty vaihe. Koherenssiajan ollessa pitkä, valon sanotaan myös olevan monokromaattista. Monokromaattisuus ei kuitenkaan tarkoita, että valo olisi koherenttia. Spektrisesti liian leveän valonlähteen käyttäminen LIDAR-analyysissä estää säteiden interferoinnin ja vähentää tulosten luotettavuutta SNR:n pienentyessä. Samasta syystä voimakkaasti Doppler-levenneen molekyylisironnan käyttäminen koherentissa LIDAR-mittauksessa ei ole mahdollista. Perinteisesti heterodyyni-LIDAR -laitteissa on käytetty tehokkaita ja kapeaviivaisia kaasui- tai kiinteän olomuodon lasereita, joiden viivanleveys on alle 1 MHz. Nykyään viivanleveys- ja tehovaatimukset pystytään täyttämään myös puolijohdelaserien ja kuituvahvistimien yhdistelmällä, kuten luvussa 5 esitetään. [14,48,49,54,57,58]

4.3 Suora detektio

Suoran detektion LIDAR-teknologia on menetelmäryhmä, joka ei hyödynnä sironta- ja paikallisoskillaattorisignaalien sekoittamista. Tekniikka on ollut käytössä 70-luvun puolestavälistä lähtien ilmakehän keski- ja yläkerrosten tutkimuksessa. Yksinkertainen periaate on kerätä niin monta fotonia kuin mahdollista ja määrittää Doppler-siirtymä taajuusilmaisimen läpi mitatuista irradianssin muutoksista. Eri menetelmät eroavat toisistaan tavoilla, joilla ne muuttavat irradianssin muutoksen Doppler-siirtymän suuruudeksi. Näitä ovat muun muassa seuraavat tekniikat.

1. Gaussisen sovituksen tekeminen korkeadisersiivisen monikanavaisen spektrometrin ulostuloon.
2. Michelsonin tai Mach-Zehnder -interferometriin perustuvan Fourier-muunnos-spektrometrin käyttö.
3. Laserin viivan virittäminen ja lukitseminen optisen kaistanpäästösuotimen jyrkästi muuttuvan transmissiokäyrän eli transmissioreunan puoleenväliin. Doppler-siirtymä saadaan mittaamalla transmittanssin muutosta verrattuna tilanteeseen, jossa Doppler-siirtymää ei ole. Suotimen reunan tiedettyjen ominaisuuksien avulla amplitudin muutos muunnetaan Doppler-siirtymän suuruudeksi. Suotimen valintaan on useita

vaihtoehtoja, mutta menetelmän herkkyys on verrannollinen suotimen transmissioreunan jyrkkyyteen. Esimerkiksi optinen interferometri kuten Fabry-Perot -etaloni ja molekulaarinen tai magneto-optinen atomaarinen absorptiokenno ovat sopivia suotimia.

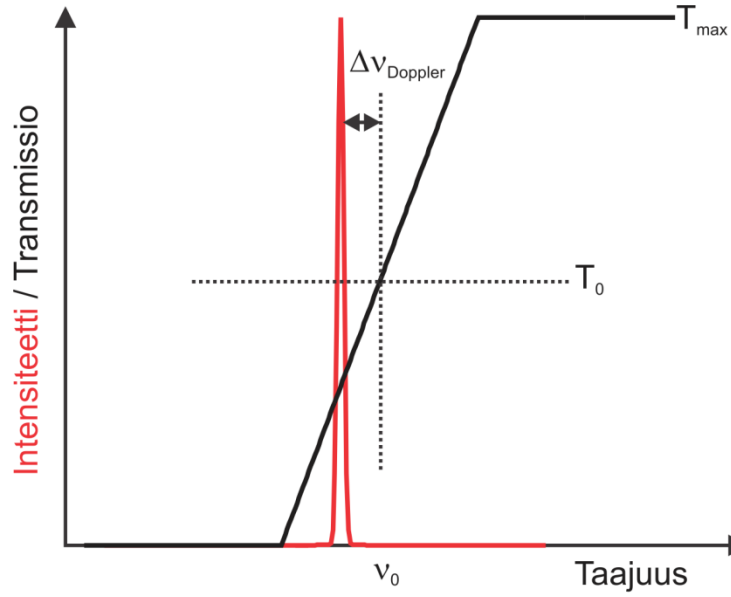
4. Optisen interferometrin ja CCD-kennon (engl. Charge-Coupled Device) käyttäminen avaruudellisen interferenssikuvion tallentamiseen. Pyöreiden interferenssijuovien poikkeamasta tai halkaisijasta pystytään määrittämään Doppler-siirtymän suuruus ja juovien paksuutta käytetään tavallisesti ilmakerroksessa vallitsevan lämpötilan mittaamiseen.

Lisäksi menetelmiä voidaan yhdistellä tai muunnella. Pyyhkivissä interferometrisissä menetelmissä Doppler-siirtymä selvitetään muuttamalla interferometrin transmissiomaksimin taajuutta. Toinen esimerkki on reunasuodinmenetelmässä kahden eri suotimen käyttäminen menetelmän luotettavuuden parantamiseksi.

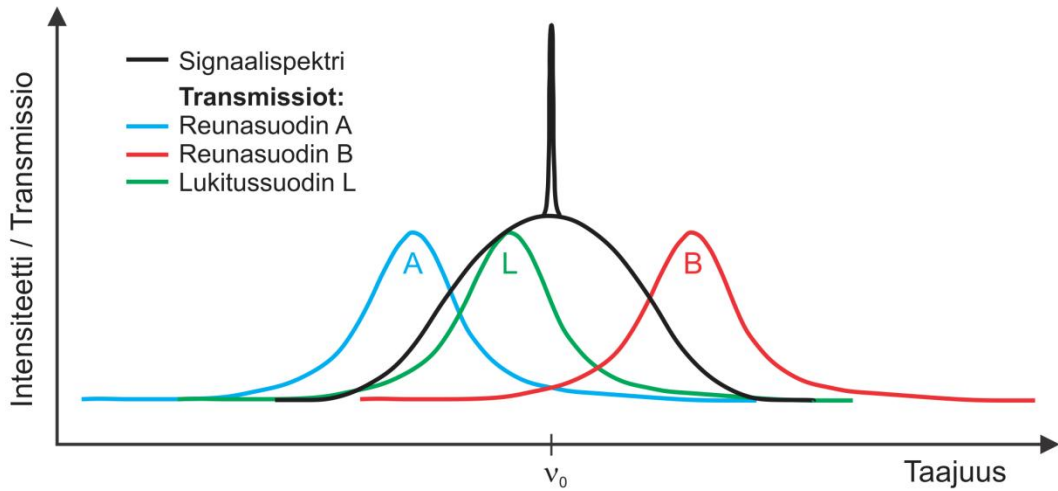
Laserin viivanleveys ei suorassa detektiossa ole yhtä rajoittava kuin heterodyynidetektiossa. Esimerkiksi reunasuodintekniikassa 100 MHz on vielä riittävä laserin viivanleveys [14,59]. Takaisinsirottajina voidaan täten käyttää aerosolien lisäksi myös ilman molekyylejä ja käytetty aallonpituus voidaan valita vastaavasti UV-alueelta. Tämä mahdollistaa myös toiminnallisuuden, jossa ilmakerroksen lämpötila mitataan Rayleigh-sirontakomponentin Doppler-levenemästä, lisäämisen tuuli-LIDAR-laitteeseen.

Edellä mainituissa menetelmissä taajuusilmaisoin on rakennettu detektoriin. On myös mahdollista käyttää ilmakehää taajuudenilmaisimena, jolloin detektori on huomattavasti yksinkertaisempi. Tällöin laserin taajuutta muunnetaan pyyhkivästi tavallisesti raudan, kaliumin tai natriumin, joita on pieniä määriä läsnä ilmakehässä, vahvojen spektriviivojen yli. Teknologia soveltuu meso- ja termosfäärissä vallitsevan tuulen tutkimiseen. Tuulen etämittaukseen on myös kehitetty menetelmiä, jotka tietyissä yhteyksissä luetaan kuuluvan suoran detektion pariin, mutta eivät perustu Doppler-ilmiöön. Taivaalta voidaan kuvaan perustuvan mittauksen avulla tunnistaa pilvi- tai aerosolikuvioita. Autokorrelaation laskeminen kahdelle eri ajanhetkellä taivaasta otetulle kuvalle antaa tiedon näiden kuvioiden nopeudesta eli tuulesta. Toinen tällainen menetelmä on LTV (engl. Laser Time-of-flight Velocimetry), jossa seurataan saman aerosolihiukkasen kuluaikaa kahden lähes yhdensuuntaisen lasersäteiden fokuspisteen välillä. [14]

Reunasuodintekniikka on tutkituimpia suoran detektion menetelmiä. Kuvassa 4.2 on esitetty kaavamaisesti suotimen toimintaa. Kaksoisreunasuotimen ero yhtä transmissioreunaa käyttävään detektiomenetelmään on esitetty todenmukaisemmin kuvassa 4.3, jossa mukana on myös kolmas eli lukitus-suodin. Jotta laserin keskitaajuuden vaihtelu ei aiheuttaisi virheellistä tulosta, laserin viiva lukitaan ohjauselektroniikan avulla ylimääräisen lukitus-suotimen transmissioreunan puoleenväliin.



Kuva 4.2 Reunasuotimen toiminta. ν_0 on LIDARin lähettämä taajuus eli se vastaa nollatuulta. Musta ja punainen käyrä kuvaavat transmissioreunaa ja laserin tai aerosolisironnan spektriä, T_0 transmissiota reunan puolivälissä ja T_{\max} maksimitransmissiota.



Kuva 4.3 Tyypillinen Fabry-Perot -kaksoisreunasuodinspektri, jossa laser on lukittu lukitussuotimen L reunan puoleenväliin. Signaali koostuu sekä Mie- että Rayleigh-komponentista. Tuulen nopeus kuvassa on 0 m/s.

Yksittäisen aerosolisirontaa käyttävän reunasuotimen signaali-kohina –suhde voidaan yksinkertaisimmassa tapauksessa esittää suotimelle saapuvien signaalifotonien ja taustafotonien suhteena:

$$\text{SNR}_{\text{sd}} = \frac{\phi_{\text{Mie}}}{\phi_{\text{Rayleigh}} + \phi_{\text{päivänvalo}}}. \quad (30)$$

ϕ_x on suotimelle saapuvien fotonien lukumäärä, jotka ovat peräisin prosessista x ja joiden taajuus on suotimen läpäisykaistalla. ϕ_{Mie} ja ϕ_{Rayleigh} riippuvat sekä suotimen

transmissiosta että mittausetäisyydellä vallitsevien aerosoli- ja molekyylisirontakertoimien arvoista. Mittausherakkyys Θ määritellään signaalin muutokseksi joka vastaa pientä nopeuden muutosta:

$$\Theta = \frac{1}{V_{LOS}} \frac{I - I_0}{I_0}. \quad (31)$$

Yhtälössä 31 I_0 ja I ovat alkuperäisen ja Doppler-siirtyneen kentän normalisoidut intensiteetit suotimen läpi mitattuna. Niissä on siis otettu satunnaiset intensiteetin vaihtelut huomioon. Virhe LOS-nopeudessa tietyssä pisteessä on tällöin [59,60]

$$\varepsilon = \frac{1}{SNR_{sd} \Theta}. \quad (32)$$

Reunasuodinmenetelmässä monia parametreja kuten mittaustilavuudessa vallitseva lämpötila, auringosta johtuva taustasignaali, suotimien transmissioviivojen ja laserin tarkat aallonpituudet sekä aerosolisironnan määrä tulee määrittää matemaattisten mallien avulla tai erillisten mittausten perusteella. Doppler-levenemä ei koskaan riipu molekyylien kollektiivisesta liikkeestä. Jos mittauksissa käytetään ainoastaan molekyyli- eli Rayleigh-sirontaa, suotimen läpäisseen intensiteetin vaihtelusta ei voida päätellä kuinka suuri osa muutoksesta johtuu Doppler-siirtymästä ja paljonko Doppler-levenemästä. Tällöin ilmakerroksen lämpötila on tiedettävä, jotta takaisinsironneen signaalin viivanleveys ja -muoto voidaan selvittää. Viivanmuoto muuttuu ratkaisevasti, jos mitattavassa ilmakehän alueessa on lisäksi runsaasti aerosoleja, kuten kuvat 3.5 ja 4.3 esittävät. Jos mittauksessa käytetään sekä Mie- että Rayleigh-sirontakomponentteja, Doppler-siirtymän selvittämiseksi tulee aerosolisironnan osuus kokonaissironnasta määrittää mahdollisimman tarkasti joko simulaation perusteella tai erillisellä mittauksella [22,61-63]. Koska aerosolihiukkaset ovat molekyyliä paljon painavampia, niiden Doppler-levenemä on merkityksetöntä. Mittaustilavuuden lämpötilaa tai sirontakertoimien arvoa ei siis tarvitse ottaa huomioon pitkiä aallonpituuksia ja täten Mie-sirontaa käyttävässä reunasuodin-LIDARissa. [14,21,23-25,48,60,61,64-69]

4.4 Jatkuvatoiminen ja pulssimuotoinen LIDAR

Tässä diplomityössä rakennetut ja mallinnetut tuuli-LIDAR -mittauslaitteistot perustuvat lähettimen laserin pulssitetuun toimintaan. Tuuli-LIDAR -lähetin voi toimia kuitenkin myös jatkuvatoimisesti tai lähetettävää kenttää voidaan moduloida satunnaisesti. Pulssimuotoisen järjestelmän muuttaminen jatkuvatoimiseksi tai päinvastoin aiheuttaa tiettyjä muutoksia laitteiston mekaniikkaan ja signaalinkäsittelyyn. Eroavaisuudet ovat lyhyesti esitetty taulukossa 4.2. [14,37,46,48,70].

Taulukko 4.1 *Jatkuvatoimisen ja pulssimuotoisen LIDAR-laitteiston vertailu*

	Fokusoitu jatkuvatoiminen LIDAR	Pulssimuotoinen LIDAR
Mittausetäisyyden valitseminen	Fokusoimalla säde eri etäisyyksille	Säteen kulkuajan perusteella aikasignaalista ikkunoidaan ajan τ_{ai} levyinen kaista
Mittauksen etäisyyden erottelukyky, ΔR	Riippuu aallonpituudesta, etäisyydestä ja lähettimen aukon koosta: $\Delta R \propto \lambda R^2 / A^2$	Pulssin pituus τ perimmäinen rajoittava tekijä: $\Delta R = \frac{c\sqrt{\tau^2 + \tau_{ai}^2}}{2}$
Nopeuksien erottelukyky heterodyyni-detektiossa, ΔV_{LOS}	Laserin viivanleveyden rajoittama: $\Delta V_{LOS} \propto \Delta v_{laser}$	Laserpulssin keston käänteisesti rajoittama: $\Delta V_{LOS} \propto \lambda / 2\tau$
Signaalin sekoittuminen mittausetäisyyksien välillä	Paljon sirottavat kohteet, kuten pilvet ja savu, saattavat aiheuttaa virheellisen tuloksen	Voidaan estää signaalin aikaikkunoinnilla
Signaali-kohinasuhde, SNR	Homogeenisessa ilmakehässä lähes riippumaton fokuksen etäisyydestä	Kollimoidun säteen tapauksessa SNR pienenee etäisyyden kasvaessa: $\propto R^{-2}$
Lähettimen ja vastaanottimen konfiguraatio	Bi- tai monostaattinen	Yleensä monostaattinen
Pienin mittausetäisyys	Riippuu lähetinvastaanottimen optiikan fokuointikykyä	Riippuu lähetinoptiikasta takaisinsiroavan signaalin suuruudesta
Suurin mittausetäisyys	Lähetinvastaanottimen aukon koon määräämä	SNR:n rajoittama. Riippuu pulssin energiasta, lähetinvastaanottimen aukon koosta ja keskiarvostettujen pulssien määrästä
Tuulivektori-mittausten tekotapa ja lukumäärä	Kartiomainen skannaus. Esimerkiksi 150 radiaalituluen nopeutta/kierros nopeudella 1 rps ja korkeuskulmalla 60°	Erilliset radiaalimittaukset esimerkiksi neljään eri ilmansuuntaan 60° asteen korkeuskulmalla
Signaalinkäsittelyn vaatimukset	Ei vaadi korkeaa laskentatehoa	Yksittäisten pulssien käsittely edellyttää laskentatehoa

4.5 Kaupalliset tuuli-LIDAR -laitteistot

Heterodyyni-LIDARissa lähettimenä käytettiin pitkään hiilidioksidilaseria ja alhaisiin lämpötiloihin jäädytettyä detektoria [16]. Laitteistot olivat siksi monimutkaisia ja kooltaan suuria. Puolijohde- ja kuitulaserien sekä uusien detektoreiden kehitys 80- ja 90-luvuilla mahdollistivat kaupallisten heterodyyni-detektiolla toimivien tuuli-LIDAR-laitteiden tuonnin markkinoille. Tällä hetkellä markkinoilta löytyy sekä pulssitettuja että jatkuvatoimisia lyhyen, eli noin 300 m, kantaman LIDAR-sovelluksia. Näistä pulssitetut LIDARit ovat tavallisesti suorituskykyisempiä pidemmän mittausmatkansa ja tehokkaamman mittausetäisyyksien eristyksen vuoksi. Kaupallisiin tuulivoimalasovelluksiin suunniteltujen tuuli-LIDAR -laitteistojen myyntihinnat alkavat noin 100 000 eurosta. Halvimmat laitteet ovat tyypillisesti jatkuvatoimisen säteen LIDAREita. Tässä diplomityössä tehdyssä kaupallisten sovellusten selvityksessä ei tullut tietoon yhtään kaupallista suoran detektion LIDAR-laitteistoa. Vaikka alailmakehän suoran detektion menetelmistä on tuotettu useita julkaisuja viime vuosina [21-25], teknologian hinta ei toistaiseksi ole kilpailukykyinen perinteisen heterodyyni-detektion kanssa. Taulukossa 4.2 on esitelty neljän markkinaosuuksiltaan suurimman kaupallisen tuuli-LIDAR-laitteen ominaisuuksia. Tiedot on saatu valmistajien verkkosivujen tuoteselosteista.

Taulukko 4.2 Kaupallisten LIDAR-laitteistojen vertailu. Taulukossa x tarkoittaa, ettei valmistaja ilmoita kyseistä ominaisuutta verkkosivuillaan.

	Windcube 8	ZephIR 300	Vindicator	Galion
Valmistaja	Leosphere	Natural Power	Catch the Wind Ltd.	SgurrEnergy Ltd. / Halo Photonics
Pulssi- / jatkuva-toiminen	pulssi	jatkuva	x	pulssi
Mittausetäisyys [m]	40-500	10-200	50-250	40-250 / 80-4000
Etäisyyden erottelukyky [m]	20	0,07-7,70	50	x
Tuulennopeuden mittausalue [m/s]	0-60	1-70	0-38	0-70
Nopeustarkkuus [m/s]	0,2	< 0,35	0,5	x
Tuulen suuntatarkkuus [°]	1,5	< 0,5	1	x
Mittauskorkeuksien lukumäärä	10	10	3	15 / 100
Mittausnopeus [s]	1	1	1	x
Käytetty aallonpituus [nm]	1540	1550	1550	x
Maksimi tehonkulutus [W]	370	69	600	150
Massa [kg]	65	55	52	85

4.6 Ympäristön epävarmuustekijät

Heterodyyni-detektiolla toimiva LIDAR-mittaus on tasaisissa olosuhteissa erittäin luotettava. Yhtälön 28 mukaan pienet signaalitason muutokset eivät merkittävästi vaikuta signaali-kohinasuhteeseen ja täten mittauksen toistotarkkuus säilyy ennallaan. Tietyt ympäristötekijät aiheuttavat kuitenkin virhettä tuulen nopeuden arvoon. Seuraavassa esitellään ympäristöstä mahdollisesti johtuvia virhelähteitä heterodyyni-LIDAR-mittauksessa. Johtuen suoran detektion laitteiston monimutkaisuudesta, kalibraation tarpeesta sekä standardisoinnin puutteesta, tässä kappaleessa ei ole kartoitettu suoran detektion LIDAR-laitteiston mahdollisia virhelähteitä.

Lasersäteen poikki kulkevat liikkuvat objektit kuten lumi- ja vesisade, pilvet sekä linnut aiheuttavat virhettä tuulen määrittämiseen. Lintujen aiheuttama poikkeuksellinen data voidaan tunnistaa signaalinkäsittelyn aikana, jos mittausaika on ollut tarpeeksi pitkä. Mittaustilavuuden kartiomainen skannaus jatkuvatoimisessa LIDAR-laitteistossa havaitsee tehokkaasti mittaussuunnat, jotka jätetään tuulen nopeuden laskennassa huomioimatta. Jatkuvatoiminen LIDAR kykeneekin pulssitettua LIDAR-laitteistoa varmemmin toimimaan rakennusten, mastojen tai puiden vierellä siten, että vain puoleen pyyhintäalasta on esteetön näkyvyys. Sade ja pilvet sirottavat runsaasti valoa. Sateen alaspäin suuntautuva liike aiheuttaa virheellisen tuulivektorin vertikaalikomponentin. Joissain kaupallisissa laitteistoissa on erillinen sadetunnistin. Aktivoituessaan se käynnistää signaalinkäsittelyalgoritmin, jolla sateen vaikutus vertikaalikomponenttiin pyritään poistamaan. Pilvet eivät tuota ongelmia pulssitetuille, alle pilvenkorkeuteen asti mittaaville LIDAR-laitteistoille, sillä pilven alareunasta sironnut signaali voidaan rajata pois aikaikkunoinnilla. Jatkuvatoimisissa LIDAREissa pilvestä peräisin oleva signaali taas sekoittuu fokusetäisyydestä riippumatta fokuksipisteessä olevien aerosolien signaaliin. Pilvien vaikutus voidaan jälleen minimoida laskennallisten menetelmien avulla. [46]

Toisin kuin pulssitetuissa laitteissa jatkuvatoimisissa LIDAREissa mitattavan ilmakehän paksuus kasvaa mittausetäisyyden kasvaessa. Tällöin tasaisen virtauksen oletamus mittaustilavuudessa ei välttämättä ole enää käypä. Mittaustilavuudessa oleva tuuligradiendi leventää taajuusavaruuden spektriviivoja ja täten heikentävät nopeuden mitaustarkkuutta. Hyvin voimakkaat tuuligradiendit haittaavat myös pulssimuotoisen LIDAR-laitteen toimintaa. Koska molemmat tekniikat suorittavat useita mittauksia, jotka ovat horisontaalisesti etäällä toisistaan yhden tuulivektorin laskemiseksi, tuottaa vaakatasoinen tuuligradiendi enemmän virhettä tulokseen kuin edellä mainittu vertikaalinen gradiendi. Vaakatasoiset tuuligradiendit ovat harvinaisia paitsi kohdissa, joissa maaston muodot vaikuttavat ilmakehän liikkeisiin. Tällaisia sijainteja kutsutaan kompleksiseksi maastoksi (engl. complex terrain). Kiinnostus kompleksisia maastoja kohtaan kasvaa tuulivoimateollisuudessa. Paikat kuten kukkuloiden huiput tai rantakalliot ovat tuuliolosuhteiltaan suotuisia paikkoja tuulivoimaloille virtausten epävakaisuudesta huolimatta. Kompleksiset maastot ovat kuitenkin haastavia tuulimittausten kannalta. Esimerkiksi kukkulan huipulla LIDAR-laitteiston mittauskartion toisella reunalla

korkeus maasta katsottuna saattaa olla satoja metrejä suurempi kuin toisella reunalla. Rinteillä on usein pystyvirtauksia, joiden myötävaikutus tuulen nopeuden laskemiseen on suurempi mittauskartion rinteen puolella. Kukkulan huipulla vallitsee täten voimakas vaakatasoinen tuuligradientti ja mitattua tuulta ei ole järkevää kuvata vain yhdellä tuulivektorilla. Tuulikentän pisteittäinen mittaus tällaisessa paikassa vaatisi vähintään kolme eri LIDAR-laitetta, joiden etäisyys on samaa suuruusluokkaa mittauskorkeuden kanssa. [71]

Alkuvalmisteluiden jälkeen tuuli-LIDAR toimii itsenäisesti eikä vaadi ihmisen ohjausta. Tietyissä kaupallisissa laitteissa on jopa toiminnallisuus reaaliaikaiselle datan seurannalle internetin välityksellä. Kuitenkin asennusvaiheessa LIDAR-laitteiston, kuten minkä tahansa muunkin tuulimittarin, tyypillisin käyttövirhe on laitteiston epätäydellinen suuntaus. Jotta mittaus tuottaisi oikeat tuulen suuntalukemat, tulee laitteiston tietää missä suunnassa sijaitsee maantieteellinen pohjoinen eli miten laite on vaakatasoon suunnattu. Laitteiston tulee tietää myös vertikaalinen suuntaus. Jos mittauskartion pysty akseli on laitteiston tietämättä kallellaan, tuulennopeuden maksimivirhe on verrannollinen tuulivektorin horisontaalikomponentin ja kaltevuuskulman sinifunktion tuloon. [46]

5 Heterodyyni-detektion mittauslaitteisto

Diplomityön aikana suunniteltiin ja rakennettiin heterodyyni-detektiolla toimiva tuuli-LIDAR. Keskusajatus oli kehittää kustannustehokas laitteisto, joka kykenisi mittaamaan tuulen nopeuden ja suunnan 300 m matkalle. Toteutuksessa lähdettiin täten liikkeelle aerosolisirontaa käyttävästä, $1,5\ \mu\text{m}$ aallonpituusalueella toimivasta mittauslaitteesta. Tämä aallonpituusalue on yleinen tietoliikennetekniikassa, joten massatuotettavien ja siksi myös taloudellisten komponenttien löytyminen oli taattu. Huolimatta komponenttien ostamisesta yksittäin jälleenmyyjiltä, laitteiston hinta jäi alle 9000 €. Summassa ei ole huomioitu signaaligeneraattorin ja oskilloskoopin hintaa. Rakennettavasta LIDARista haluttiin tehdä myös kuitukytketty, mikä osaltaan myös puolsi tietoliikennekomponenttien käyttöä. Kuituoptisen laitteiston haittana on suuri signaalinmenetys takaisinsironneen säteilyn yhdistämisessä kuituun. Kuitenkin edut, kuten sironta- ja LO-säteiden muotojen täydellinen peittyminen ja siitä aiheutuva voimakkaampi huojuntasignaali sekä laitteiston vankkatekoisuus, enemmän kuin kompensoivat huonoja puolia.

Kappaleessa 5.1 on yleisluontoinen katsaus optisiin kuituihin ja kuituoptiikan keskeisiin termeihin. Valolla toimivia sovelluksia ja komponentteja kehittävää tieteenhaaraa kutsutaan fotonikaksi. Laitteiston komponenttien myötä fotonikka on tärkeä osa tätä diplomityötä. Kappaleissa 5.2-5.7 on lyhyt esittely kustakin laitteistossa käytettävästä fotonikkakomponentista ja sen fysikaalisesta toimintaperiaatteesta. Kaikki laitteiston optiset osat ovat kuitukytkettyjä. Lopuksi, kappaleessa 5.8, käydään vaiheittain läpi komponenttien toiminta osana tuuli-LIDAR –laitteistoa.

5.1 Optiset kuidut

Diffraction takia homogeenisessa väliaineessa matkaava valonsäde hajoaa eli divergoi edetessään. Divergenssi estyy kuitenkin dielektrisestä materiaalista valmistetussa aaltojohteessa kuten optisessa kuidussa. Optisia kuituja on nykyään kaikkialla. Niiden pituudet eri sovelluksissa vaihtelevat alle metrin pituisesta, LIDAR-laitteen komponentteja yhdistävästä johteesta tuhansien kilometrien pituisiin merenalaisiin kaapeleihin. Suurimman vaikutuksen pienihäviöisten kuitujen kehitys on tehnyt tietoliikennetekniikkaan. 1980-luvun lopulta lähtien laajennut maailmanlaajuinen optinen tiedonsiirtoverkko käsittää tällä hetkellä satoja miljoonia kilometrejä valokuitua. [72]

Perinteisen tietoliikennekuidun raaka-aine on piidioksidi, jota muodostuu piikloridin ja veden reagoidessa $800\text{--}1200\ ^\circ\text{C}$ lämpötilassa. Höyrystynyt piidioksidi muodostuu muottiputken sisään tai hitaasti liekistä poispäin liikkuvaan pyörivään alustaan kuidun esiasteeksi, joka jatkokäsittelyssä venytetään ohueksi kuiduksi. Tavallisesti kuidun

poikkileikkaus koostuu kahdesta ympyräsymmetrisestä osasta: sisemmästä ytimestä (engl. core) ja ulommasta vaipasta (engl. cladding). Aaltojohteissa ytimen taitekerroin on vaipan taitekerrointa hieman suurempi. Taitekertoimien erotus tavallisissa yksimuotokuiduissa on suuruusluokkaa 10^{-3} . Taitekertoimen säätö valmistusprosessissa tapahtuu lisäämällä eli rikastamalla reaktiivilavuutta eri alkuaineilla. Germanium, fosfori ja alumiini nostavat lasin taitekerrointa kun taas boori ja fluori laskevat sitä. Taitekertoimen säätelyalkuaineet tuodaan reaktiivilavuuteen halidihöyrynä hapen toimiessa kantokaasuna. Vaipan ympärillä on synteettisestä materiaalista, kuten kevlarista, valmistettu, paksu suojakerros (engl. buffer), jonka päällä on tavallisesti vielä muovinen suojakuori (engl. jacket). Suojakerrokset eivät vaikuta kuidussa etenevään kenttään. Vaipan paksuus on valittu tarpeeksi suureksi, jotta vaippaan ytimestä tunkeutuvan häviävän kentän (engl. evanescent field) amplitudi on käytännöllisesti katsoen nolla vaipan ulkoreunalla. [72,73]

Aaltojohteessa sähkömagneettisen säteilyn etenemismuoto on kentän etenemissuuntaa vastakkain oleva kenttäjakauma, joka ei muutu paikan funktiona säteilyn suunnassa. Sitä useimmiten kutsutaan optiseksi muodoksi tai pelkästään muodoksi (engl. mode). Eri muodoilla on ominainen etenemisvakio ja täten myös vaiheen muutosnopeus. Kentän amplitudi voi muuttua, jos säteily matkaa häviöllisessä tai vahvistavassa väliaineessa, mutta poikittainen muotoprofiili siis säilyy. Yleisin vahvistava väliaine on aktiivinen kuitu, jossa etenevän kentän amplitudi kasvaa stimuloidun emission avulla. Täysin häviötöntä kuitua ei ole olemassa. Optisten muotojen kenttäjakauma saadaan Maxwellin yhtälöistä johdetun ominaisarvoyhtälön ratkaisuna. Aaltojohteen geometria määrää yhtälön reunaehdot. Geometrisen optiikan kokonaisheijastuksen käsite ei tällöin ole enää riittävä muodon syntymisen peruste. Se on ainoastaan välttämätön ehto. [73]

V-luku kertoo, montako muotoa kuidussa voi kulkea polarisaatiotilaa kohden. Sen alla oleva määritelmä pätee kuiduissa, joissa taitekerroin on vakio ytimessä ja vaipassa ja muutos näiden kahden välillä tapahtuu yhdessä askelmassa.

$$V\# = \frac{2\pi r_{y\text{din}}}{\lambda} \sqrt{n_{y\text{din}}^2 - n_{vaippa}^2} \quad (33)$$

Yhtälössä 33 $r_{y\text{din}}$ on ytimen säde ja $n_{y\text{din}}$ ja n_{vaippa} ytimen ja vaipan taitekertoimet. V-luvun ollessa alle 2,405 kuidussa voi kulkea vain yksi muoto ja tällaista kuitua kutsutaan yksimuoto- tai SM-kuiduksi (engl. single mode). Monimuotokuiduissa V-luku on luonnollisesti huomattavasti suurempi. [73]

Kahtaistaittavuus on ilmiö, jossa taitekerroin riippuu polarisaatiosta. Kääntäen tästä seuraa polarisaatiotilan muuttuminen, jos säteilyn väliaine ei ole isotrooppista. Vaikka yksimuotokuidun poikkileikkaus on suunniteltu ympyrämuotoiseksi, paikoissa, joissa kuitu on jännityksessä, materiaalin symmetria rikkoontuu. Polarisaation muuttuminen voidaan estää voimakkaasti kahtaistaittavalla PM-kuidulla (engl. polarization maintaining). Niissä symmetria on tahallaan rikottu kuidun akselin suuntaisesti kulkevalla, kuituun poikittaista jännitystä aiheuttavilla lasirihmoilla tai tekemällä ytimeä ellipsin muotoisen. Kuidun poikkileikkaukseen muodostuu tällöin hidas ja nopea akseli, joiden

suuntaisesti polarisoituneet kentät kulkevat eri nopeuksilla. Jos saapuva kenttä on polarisoitunut akselien suuntaisesti, rakenne tekee kytkennän polarisaatiotilojen välillä vaikeaksi, vaikka kuituun kohdistuisi ulkoistakin jännitystä kuten taivutusta [74,75]. Heterodyyni-LIDAR -laitteistossa polarisaation pitävän kuidun ja komponenttien käyttäminen parantaa säteiden interferenssiä ja täten vahvistaa huojuuntasignaalia. Johtuen PM-komponenttien korkeasta hinnasta ja tavoitteesta tutkia kustannustehokasta LIDAR-teknologiaa, suuri osa diplomityössä rakennetun laitteiston komponenteista ei kuitenkaan ole polarisaation pitävää.

Kuituoptiset komponentit eroavat vapaan tilan optiikan komponenteista siinä, miten valo tuodaan komponenttiin sisälle ja komponentista ulos. Komponentin sisällä valo voi hetkellisesti olla vapaassa tilassa. Sisään- ja ulosmenot voivat joko olla erillisiä kuituhaaroja tai komponentin kyljessä olevia kuidun kytkentäliittimiä. Tehohäviöiden ja takaisinheijastusten välttämiseksi myyntiin tarkoitettujen laitteiston komponenttien kuituhaarat on suotavaa sulattaa yhteen (engl. fusion splicing). Kokeellisessa laitteistossa tämä on kuitenkin epäkäytännöllistä laitteiston muokkauksen kannalta. Niinpä rakennetussa LIDAR-laitteistossa on käytetty kuituliittimiä, joilla voidaan nopeasti yhdistää ja erottaa kaksi kuitua. Riippuen kytkimestä yhdistäminen tapahtuu lukitushaalla tai kiertämällä kuidunpää hyvin tarkasti työstettyyn liitinholkkiin (engl. mating sleeve). Holkki kohdistaa kuitujen tyimet mahdollisimman kohtisuoraan ja painaa ne yhteen.

Taulukko 5.1 Yleisimpien kuituliittimien kytkentähäviöt. Ensimmäinen arvosarake ilmoittaa liittimen läpäisseen ja alkuperäisen tehon suhteen ja toinen liittimestä heijastuneen ja alkuperäisen tehon suhteen. [76]

Kuituliitin	Tehohäviö [dB]	Takaisinheijastavuus [dB]
SMA	$\geq -1,0$	-45
FC/FL	$\geq -1,0$	-14
FC/PC	$\geq -0,5$	-27
FC/SPC	$\geq -0,5$	-40
FC/UPC	$\geq -0,5$	-50
FC/APC	-0,17	-67

Monet eri yritykset ovat kehittäneet omia versioitaan kuituliittimistä, jotka olisivat mahdollisimman pienihäviöisiä ja vähän valoa heijastavia. Tällä hetkellä yleisemmin käytössä on NTT-yhtiön (Nippon Telegraph and Telephone Co.) kehittämä FC-liitin (engl. Ferrule Connector tai Fixed Connection), josta on NTT:n toimesta kehitetty useita paranneltuja versioita: FC/FL (engl. FLat end), FC/PC (engl. Physical Contact), FC/SPC (engl. Super Physical Contact) ja FC/UPC (engl. Ultra Physical Contact), joissa kuidun pää kiillotusaste nousee listassa eteenpäin mentäessä. Suorituskykyisin FC-liitin on FC/APC-liitin (engl. Angled Physical Contact), joka on kiillotettu 8° kulmaan kuitua vasten kohtisuoraan tasoon nähden. Rakenne ohjaa suurimman osan takaisinhei-

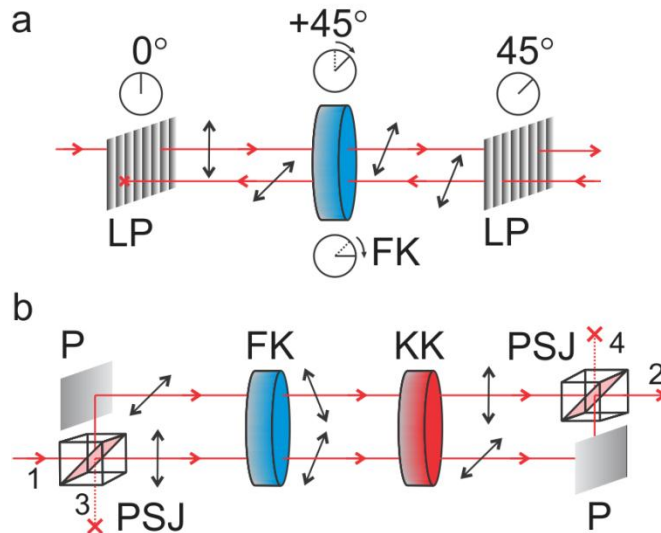
jastuneesta valosta ytimen sijasta kuidun vaippaan, jossa se lopulta vaimenee. FC/APC saavuttaa jopa yli -60 dB takaisinheijastustason kuten esitetty taulukossa 5.1. [72] Tästä syystä tässä diplomityössä on käytetty ainoastaan FC/APC-liittimiä.

5.2 Faraday-isolaattorit ja -sirkulaattori

Optiset isolaattorit päästävät lävitseen kulkevaa valoa vain yhteen suuntaan. Ne ovat tärkeitä lasereiden ja kuituvahvistimien stabiilin toiminnan takaamisessa estäen takaisinheijastunutta valoa palaamasta laserkaviteettiin tai vahvistavaan väliaineeseen. Sirkulaattorit ovat samankaltaisia komponentteja, mutta ne ohjaavat vastakkaiseen suuntaan kulkevan valon eri optiselle polulle. Molempien toiminta perustuu polarisaattoriin ja Faraday-kennoon, mutta sirkulaattorissa on lisäksi optisesti aktiivinen, kahtaistaittava kide. Lineaaripolarisaattori päästää lävitseen vain tietyn suuntaisen polarisaatiokomponentin. Vastakkainen polarisaatiokomponentti joko absorboituu polarisaattoriin tai se ohjataan eri optiselle polulle. Jälkimmäistä kutsutaan polarisoivaksi säteenjakajaksi ja sitä voidaan käyttää myös vastakkaisten polarisaatiokomponenttien yhdistäjänä. Michael Faraday havaitsi vuonna 1845 valon polarisaatiotason kiertävän akselinsa ympäri, kun valo kulkee väliaineessa, jonka sisällä vaikuttaa säteen suuntainen magneettikenttä. Kiertymiskulma riippuu materiaalista ja on lisäksi suoraan verrannollinen magneettikentän B suuruuteen ja väliaineen pituuteen d :

$$\theta = \mathcal{V}Bd. \quad (34)$$

\mathcal{V} on eri materiaaleille ominainen Verdet-vakio. Joillakin kiteisillä aineilla kuten TGG (terbium-gallium-granaatti) on huomattavan korkea Verdet-vakio, jonka vuoksi se on yleisesti käytössä kaupallisissa Faraday-kennoissa. Toisin kuin kahtaistaittava kide, Faraday-kenno muuttaa polarisaation kiertosuuntaa riippuen valon kulkusuunnasta, sillä magneettikentän etumerkki yhtälössä 34 muuttuu. Faraday-kennon läpi kulkenut takaisinheijastunut säde on siis kokenut 2θ polarisaatiotason kierron saapuessaan lähtöpisteeseensä, kun taas kahtaistaittavan kiteen tapauksessa nettokiertymä on nolla. Kuva 5.1 näyttää esimerkin, kuinka pääkomponenteista voidaan rakentaa isolaattori ja neliporttinen sirkulaattori. [77,78]



Kuva 5.1 Isolaattorin ja neliporttisen sirkulaattorin kokoaminen optisista elementeistä. LP = Lineaaripolarisaattori, FK = Faraday-kenno, KK = Kahtaistaittava kiide, PSJ = Polarisoiva säteenjakaja, P = Peili. Mustat nuolet kuvaavat polarisaation suuntaa.

a) Säteiden kulku päinvastaisiin suuntiin isolaattorissa.

b) Esimerkissä valo kulkee sirkulaattorin portista 1 porttiin 2. Samaan tapaan esimerkiksi porttiin 2 saapuva valo ohjautuu portista 3.

Tässä diplomityössä rakennetussa laitteistossa on käytetty taloudellisia tietoliikenne isolaattoreita (IO-H-1550APC, Thorlabs Inc.) ja kolmiporttista sirkulaattoria (AFW Technologies Pty. Ltd.), jotka toimivat tehonkestoja ylärajoilla. Isolaattori vaimentaa takaisinkulkevaa valoa -31,23 dB ja sirkulaattori FC/APC-liittimet huomioituna -57 dB. Sirkulaattorin tehovuoto yhden kanavan yli väärään lähtevään kanavaan on -56 dB.

5.3 Säteenjakajat ja -yhdistimet

LIDAR-laitteistossa ennen lasersäteen lähettämistä taivaalle osa lasertehosta ohjataan erilliseen paikallisoskillaattorihaaraan säteenjakaja-komponentilla. Rakennetussa laitteistossa käytetään sulatettuja jakajia (engl. fused couplers), joissa ei ole erillisiä vapaan tilan optiikan komponentteja. Komponentti koostuu kahdesta yksimuotokuidusta, joiden ytimet on lämmittämällä tuotu toisiinsa kiinni. Sulatusprosessista riippuu, mikä on eri haarojen tarkka jakosuhde. Sulatetut jakajat tehdään aina tietylle suunnitteluaallonpituudelle. Diplomityön laitteistossa käytetään 1550 nm aallonpituudelle suunniteltuja jakajia, joiden toimintakaista ylittää 40 nm suunnitteluaallonpituuden molemmille puolille. LO-haaraan ohjattava teho on peräisin jakajalta, jonka jakosuhde on 1/99 tai 10/90 (10202A-99-APC ja 10202A-90-APC, Thorlabs Inc.). Jakajat toimivat myös toiseen suuntaan, jolloin kaksi eri signaalia voidaan yhdistää samaan kuituun. Prosessi on kuitenkin suuresti häviöllinen. Kaksi yksimuotoista ja samantaajuisia kenttää voidaan yhdistää häviöttömästi samaan yksimuotokuituun ainoastaan, jos kentät ovat keskenään täydellisen koherentteja. Kaupallisissa yksimuotojakajissa onkin usein neljä haaraa, jolloin säteitä yhdistäessä häviöteho ohjataan toiseen ulostulohaaraan. Sädettä jaettaessa

2x2 jakajalla toinen sisäänmenokuitu on käyttämätön. LIDAR-laitteistossa LO- ja signaalisäde yhdistetään 1/99 jakajalla. Tällöin 99 % alkuperäisestä LO-signaalista päätyy käyttämättömään haaraan. Toisaalta signaalihaaraan päätyvä LO-teho on tästä huolimatta moninkertaisesti signaalisädettä voimakkaampi ja näin menetetään mahdollisimman pieni osa sironneesta tehosta.

Edellä kuvattu rajoitus yksimuotoisten signaalien yhdistämisessä poistuu, jos yhdistettävien signaalien aallonpituudet poikkeavat selvästi toisistaan. Tällaista komponenttia kutsutaan WDM:ksi (engl. Wavelength Division Multiplexer) ja se voidaan valmistaa samanlaisesti kuituja sulattamalla tai käyttämällä interferenssisuodinta. Yleisimmät WDM-suunnitteluaallonpituudet ovat 980/1550, 1310/1550 ja 1480/1550 nm ja niiden toimintakaista on noin ± 20 nm. Diplomityössä käytetyt 980/1550 nm WDM-komponentit on valmistettu TTY:n Optoelektroniikan tutkimuskeskuksessa.

Pumppusäteeksi tai –tehoksi kutsutaan sädettä, joka virittää vahvistavan väliaineen rikasteatomeja. Pumpputehon ja signaalin yhdistäjät ovat ftoniikkakomponentteja, joissa on erilliset sisääntulohaarat yksimuotoiselle signaalille ja monimuotoisille pumppusäteille. Niitä käytetään kuitulasereissa ja suuritehoisissa kuituvahvistimissa, joissa aktiivisen kuidun rikastettu ydin kulkee erityisen kaksoisvaipparakenteen sisällä. Ulos tulevassa haarassa signaali kulkee yksimuotoisessa ytimessä ja pumpputeho monimuotoeroksessa ytimen ympärillä. [72] Kaksoisvaipparakennetta on kuvattu tarkemmin kappaleessa 5.6. Pumppusäteiden sisäänmenohaarojen lukumäärä vaihtelee kahdesta jopa 18 kappaleeseen. Näin rikasteatomien koko vahvistuskaista pystytään kattamaan hieman eri taajuisilla pumppusäteillä.

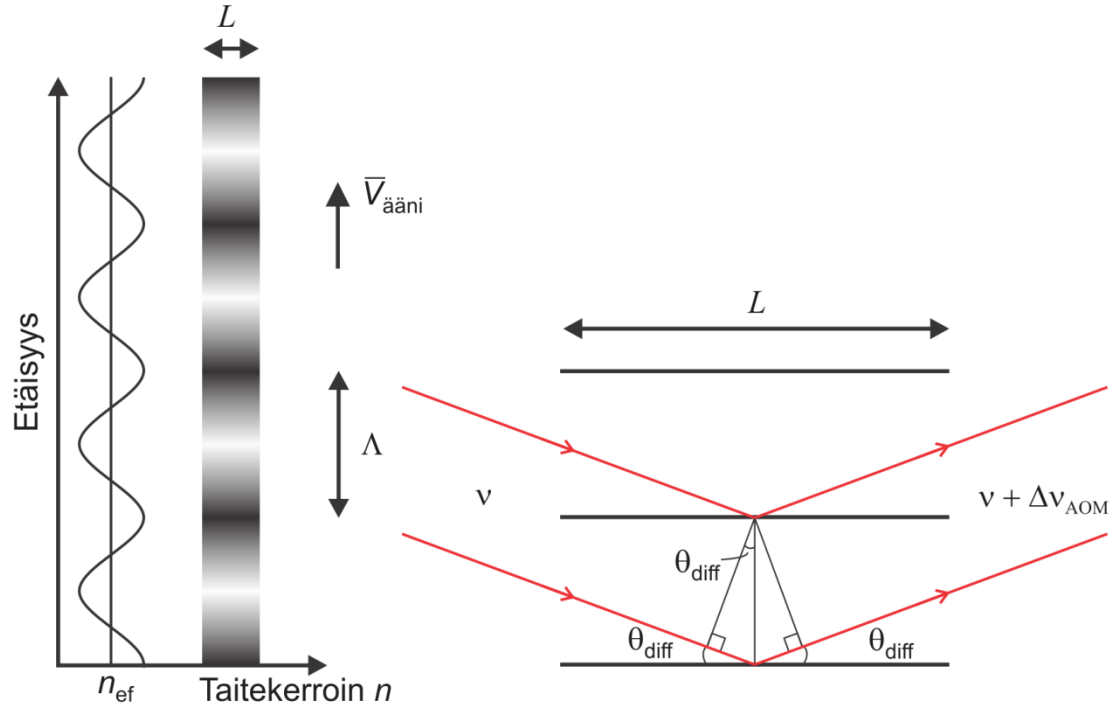
5.4 Akusto-optinen modulaattori

Akusto-optista modulaattoria eli Braggin kennoa käytetään valon intensiteetin, taajuuden tai suunnan säätämiseen. Se perustuu akusto-optiseen ilmiöön, joka tarkoittaa väliaineen taitekertoimen paikallista muuttamista ääniaalloilla. Akustinen aalto aiheuttaa väliaineessa vuoroittaisia tihentymiä ja harventumia akustisen aallonpituuden välein. Tällöin myös taitekerroin tulee periodisesti moduloitua ja materiaali toimii kuten taitekerroinhila. Ääniaaltorintamia voidaan pitää osittain heijastavina tasopeileinä. Kuvan 5.2 mukaisesti diffraktiokulma θ_{diff} on sama kuin valon tulokulma. Konstruktiivinen interferenssi seuraa, jos peräkkäisistä aaltorintamista heijastuneet valonsäteet ovat samanvaiheisia. Tällöin

$$2n\Lambda \sin \theta_{diff} = l\lambda, \quad l \in \mathbb{Z}, \quad (35)$$

missä λ on valon tyhjiöaallonpituus, n aineen taitekerroin ja Λ ääniaaltojen aallonpituus. Yhtälö 35 tunnetaan Braggin diffraktiolakina. Tämä päättely ei vielä ota huomioon ääniaaltojen liikettä. Yllä olevaa kehittyneempi tarkastelutapa on tutkia hiukkastörmäystä fotonin ja akustisen fononin eli hilavärähtelyn kvantin avulla. Braggin laki seuraa tällöin liikemäärän säilymislaista. Energian säilyminen taas vaatii sironneen fotonin taajuuden kasvavan tai vähenevän äänen taajuuden verran kun fononi lähestyy tai loittonee

fotonista. Taajuuden muutosta voidaan myös ajatella Doppler-siirtymänä, kun valo heijastuu äänen nopeudella kulkevasta peilistä. [79]



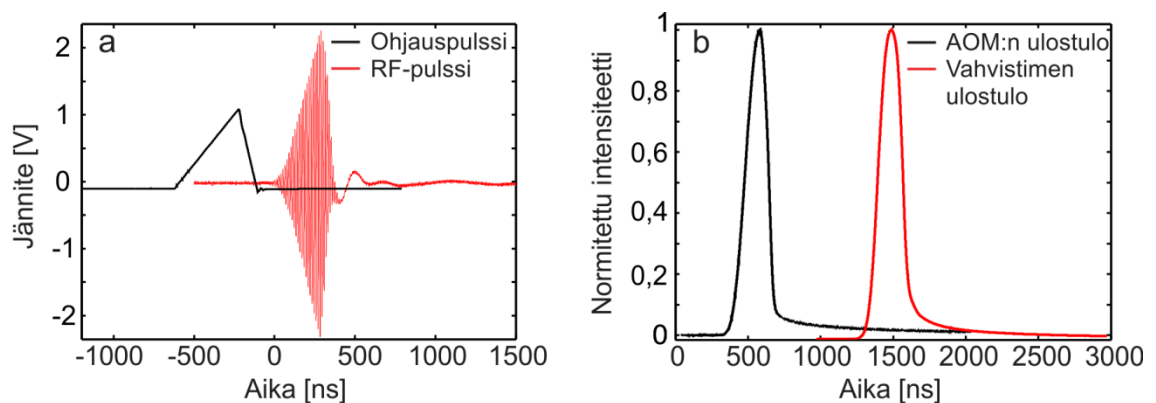
Kuva 5.2 Pysäytetty ääniaalto akusto-optisessa materiaalissa. Vasemmalla on periodinen taitekerroin materiaalissa kulkevan ääniaallon aiheuttamissa tihentymissä ja harventumissa. Oikealla: valon heijastuminen ääniaaltorintamasta. Säteiden matkaero on optisen aallonpituuden monikerta.

Havaittujen diffraktiokertalukujen lukumäärä riippuu akusto-optisen modulaattorin Q -kertoimesta

$$Q_{\text{AOM}} = \frac{2\pi\lambda L}{n\Lambda^2}. \quad (36)$$

Yhtälössä 36 L on matka, jonka lasersäde matkaa ääniaaltorintaman läpi. Jos $Q_{\text{AOM}} \gg 1$ AOM:n sanotaan toimivan Braggin alueella. Laite antaa ulostulossaan tällöin vain ensimmäisen diffraktiokertaluvun, $l=1$, heijastuksen. Muut häviävät destruktivisen interferenssin vaikutuksesta. Useimmat kuitukytketyt akusto-optiset laitteet toimivat Braggin alueella. Raman-Nath –alueella toimivissa laitteissa $Q_{\text{AOM}} \ll 1$, jolloin voidaan havaita useita diffraktiokertalukuja $l = \dots -2, -1, 0, 1, 2 \dots$. Äänen taajuus on yleensä radiotaajuuksista, muutamista kymmenistä useisiin satoihin megahertzeihin. Se tuotetaan piezosähköisellä elementillä, joka saa virtansa erillisestä radiotaajuisesta eli RF-teholähteestä. Akusto-optisena materiaalina käytetään kiteitä kuten TeO_2 tai lasia kuten silikaa SiO_2 . Materiaalin valinta riippuu käytettävän laserin aallonpituudesta. Vapaan tilan akusto-optisissa modulaattoreissa sisään menevästä tehosta voidaan saada jopa 95 % diffraktoitumaan. Kuitukytketyissä laitteissa tehohäviöt ovat suurempia johtuen diffraktoituneen valon uudelleenkytkemisestä kuituun. [79-81]

Diplomityössä käytetty akusto-optinen modulaattori (T-M080-sarja, Gooch & Housego Plc.) on PM-kuitukytetty, polarisaation pitävä komponentti, jonka kytentähäviö on 42 %. Sen TeO_2 -kiteeseen tuotetaan ääniaaltoja 80 MHz taajuudella ja 1,87 W RF-teholla. Sitä käytetään jatkuvatoimisen puolijohdelaserin valon pulssittamiseen ja taajuussiirtoon. RF-teholähdettä (A35080, Gooch & Housego Plc.) ohjataan signaali-generaattorista tulevalla epäsymmetrisellä kolmiopulssilla. Teholähteen ja signaali-generaattorin modulaatiosignaalit ovat esitetty kuvassa 5.3 a. Tuloksena AOM:n ulostulossa havaitaan 80 MHz taajuudessa ylöspäin siirtyneitä 200 ns pitkiä pulsseja 50 kHz toistotaajuudella. Pulssien aikaprofiili on tehty tahallaan takapainoiseksi, jotta AOM:a seuraavan kuituvahvistimen ulostulossa saataisiin mahdollisimman symmetrisiä pulsseja.



Kuva 5.3 Laitteiston elektroniset ja optiset pulssit.

- a) RF-lähdettä moduloiva kolmiopulssi ja sitä seuraava 80 MHz RF-signaali.
 b) Huipunormitetut optiset ulostulopulssit AOM:n jälkeen ja LIDARin ulostulosta. Kuvassa näkyvä pulssin pitkä vaimenemisaika on mittausta haittaava tekijä.

Kuvissa pulssien välistä viivettä on suurennettu esitysteknisistä syistä.

5.5 Optoelektroniset komponentit

Optoelektronisiksi komponenteiksi kutsutaan laitteita, jotka perustuvat fotonien ja puolijohdeiden vuorovaikutukseen. Tässä kappaleessa käsitellään valoa lähettäviä ja ilmaisevia optoelektronisia komponentteja, joita hyödynnetään diplomityössä rakennetussa mittauslaitteistossa. Näistä merkittävin on puolijohdelaser. Puolijohdelasereita löytyy kotitaloustuotteista, tietoliikenneverkoista, viivakoodinlukijoista ja monista muista sovelluksista. Yleisyytensä vuoksi sitä voidaankin pitää kaikkein tärkeimpänä laserina. Sen etuja ovat muun muassa:

1. Pieni koko: kiteen sivujen pituudet ovat kymmeniä tai satoja mikrometrejä.
2. Toimii pienitehoisella virralla.
3. Laserin pumppaus toimii suoraan sähkövirralla ilman välivaiheita. Optisen signaalin modulaatioon tarvitsee ainoastaan moduloida pumppausvirtaa.
4. Hyötysuhde sähkötehon muuttamiselle optiseksi tehoksi on parhaimmillaan yli 50 %.
5. Pitkälle kehitetty massatuotantotekniikka alentaa yksittäisen laserin kustannuksia.

Ennen komponenttien esittelyä kappaleessa on lyhyt johdanto puolijohteisiin ja pn-liitokseen, joka on yksi puolijohdetekniikan keskeisimmistä käsitteistä. [82,83]

Yksittäisten atomien muodostaessa kidehilan elektronien aaltofunktiot peittyvät naapuriatomien elektronien aaltofunktioiden kanssa. Kvanttimekaniikan yhden tärkeimmän aksiooman, Paulin kielto säännön, mukaan kaksi elektronia eivät voi jakaa yhteistä kvanttitilaa. Tämä tarkoittaa, että jokaisella kiteen elektronilla on eri avaruudellinen aaltofunktio ja energia. Yksittäisen atomin energiatilat levenevät täten eri energioiksi, jotka ulottuvat koko kiteen alueelle. Uloimmat elektronit eivät näin ole enää lokalisoituneet tietyille atomille vaan tarpeeksi energettiset elektronit voivat liikkua kiteen halki. Materiaalit voidaan jakaa kolmeen luokkaan sen perusteella, miten elektronit miehittävät energiavyöt 0 K lämpötilassa. Jos elektroneja sisältävä vyö on miehitetty kokonaan ja energiassa seuraava vyö on kokonaan tyhjä, aine on joko puolijohde tai eriste. Tyhjän johtavuusvyön ja täyden valenssivyön välissä on energia- eli vyörajo (engl. band gap). Vyöraon ollessa noin 3 eV tai suurempi, elektronien terminen virittyminen vyöraon yli on merkityksetöntä. Tällöin ulkoinen sähkökenttä ei aiheuta virran kulkua kiteessä, koska täydessä vyössä olevat elektronit ovat Paulin kielto säännön mukaan estyneitä liikkumaan ja aine on eriste. Puolijohdteessa vyörajo on 2,5 eV tai pienempi, jolloin terminen virittyminen nostaa elektroneja valenssivyöltä johtavuusvyölle. Koska johtavuusvyöllä on runsaasti tyhjiä tiloja eli elektroniaukkoja, elektronit pystyvät kiihtymään sähkökentän vaikutuksesta aiheuttaen sähkövirran. Metalleilla vyöt peittyvät toistensa päälle tai ovat vain osittain miehitettyjä. Elektronit pääsevät täten kulkemaan metallihilan sisällä lämpötilasta riippumatta. [82,84]

Puolijohdelaserin emittoimat fotonit ovat energialtaan lähellä vyöraon suuruutta. Vyörajo on taas materiaalikohtainen ominaisuus. Useassa tapauksessa materiaali, jolla on haluttu vyörajo, voidaan kuitenkin valmistaa. Puolijohdelaserien valmistus perustuu

epitaksiaksi kutsuttuun atomikerroksittaiseen kiteen kasvuun. Jotta kiteen hilavakio ei muuttuisi kasvusuunnassa liian nopeasti, materiaalin seossuhdetta muutetaan kerros kerrokselta kunnes tavoiteltu seossuhde saavutetaan. Esimerkiksi muuttamalla indiumin ja galliumin suhdetta InGaAs-puolijohdteessa voidaan vyörakoa muuttaa InAs:n 0,36 eV ja GaAs:n 1,43 eV välillä. Puolijohdemateriaaliin voidaan lisäksi tarkoituksella tuoda epäpuhtauksia muuttamaan puolijohteen johtavuusominaisuuksia. Rikastamalla puolijohdetta donori- tai akseptori-atomeilla saadaan materiaali, jossa suurin osa varauksenkuljettajista on elektroneja tai aukkoja. Puolijohdetta kutsutaan tämän jälkeen vastaavasti n-tyyppin tai p-tyyppin puolijohdeksi. Yhteisnimitys rikastetulle puolijohdeelle on epäpuhtauspuolijohde. Täydellistä puolijohdekidettä, jossa ei ole epäpuhtauksia eikä täten varaustenkuljettajia pienissä lämpötiloissa, kutsutaan itseispuolijohdeksi. [84]

Pn-liitos syntyy, kun n- ja p-tyyppin puolijohdemateriaalit yhdistetään. Liitoksessa puolijohdemateriaalien välissä on siirtymäalue, jota kutsutaan tyhjennysalueeksi tai aktiiviseksi alueeksi. Kun liitoksen yli kytketään ulkoinen esijännite siten, että virta kulkee p-tyyppin puolijohdeelta n-tyyppin puolijohdeelle, johtavuusvyön elektronit virtaavat n-tyyppin puolijohdemateriaalista tyhjennysalueelle. Samalla myös p-tyyppin puolijohteen valenssivyön elektroniaukot kulkeutuvat tyhjennysalueelle. Jos esijännite on tarpeeksi suuri, puolijohdemateriaalien väliin muodostuu inversioalue, jossa elektroneja on enemmän johtavuus- kuin valenssivyöllä. Yksittäisen elektronin viritystila purkautuu transitiolla johtavuusvyöltä valenssivyölle eli elektronin ja aukon rekombinaatiolla. Elektronin siirtyessä alemmalle energiatilalle emittoituu fotoni, jonka energian vähimmäisarvo on vyöraon suuruinen. Populaatioinversion vuoksi spontaanisti emittoitunut fotoni saa aikaan fotonien lukumäärän kasvamisen vahvistinaineessa. Kuvatussa homo-liitosrakenteessa inversioalue on liian paksu, jolloin kaikki rekombinaatiot eivät kasvata laserin säteilykenttää. Heteroliitos- ja kaksois-heteroliitosrakenteessa n- ja p-tyyppin materiaalien väliin on kerrostettu puolijohdemateriaaleja, joiden vyörako on ulompien kerrosten vyörakoa pienempi. Rakenne ikään kuin vangitsee varauksenkuljettajat pienelle alueelle liitoksen keskelle. Populaatioinversio saadaan täten synnytettyä vain keskimäiseen kerrokseen, jonka paksuus voidaan valmistaa halutunlaiseksi. Koska eri kerroksessa voidaan käyttää eri taitekertoimia, heterorakennetta hyödynnetään myös fotonien vangitsemiseen laserresonaattorin sisään. Heterorakenteet parantavat täten säteen laatua ja alentavat laseroinnin kynnysvirtaa. Nykyajan huoneenlämpötilassa toimivissa puolijohdelasereissa käytetään kvanttikaivorakenteita, jotka ovat kehittyneitä heterorakenteita. Niillä elektronit ja aukot voidaan vielä edellistä tehokkaammin vangita laserin aktiiviseen alueeseen ja kvantittuneen energiatilarakenteen ansiosta populaatioinversio saavutetaan pienemmällä pumppuvirrantiheydellä. [83, 85]

Kaikissa laserresonaattoreissa eli kaviteeteissa on optinen takaisinkytkentä, jotta fotonit kulkisivat edestakaisin vahvistinaineen lävitse. Stimuloidusti emittoituneiden fotonien lukumäärä kasvaa resonaattorin takaisinkytkennän määrittämässä suunnassa, jos resonaattorin kiertämiseen fotonilta kulunut aika on optisen jaksonajan monikerta. Lisäksi vaaditaan, että valon vahvistuminen on voimakkaampaa kuin kaviteetin häviöt. Laseroimisen kynnysjännite riippuu siis paitsi puolijohdemateriaaleista, myös takaisin-

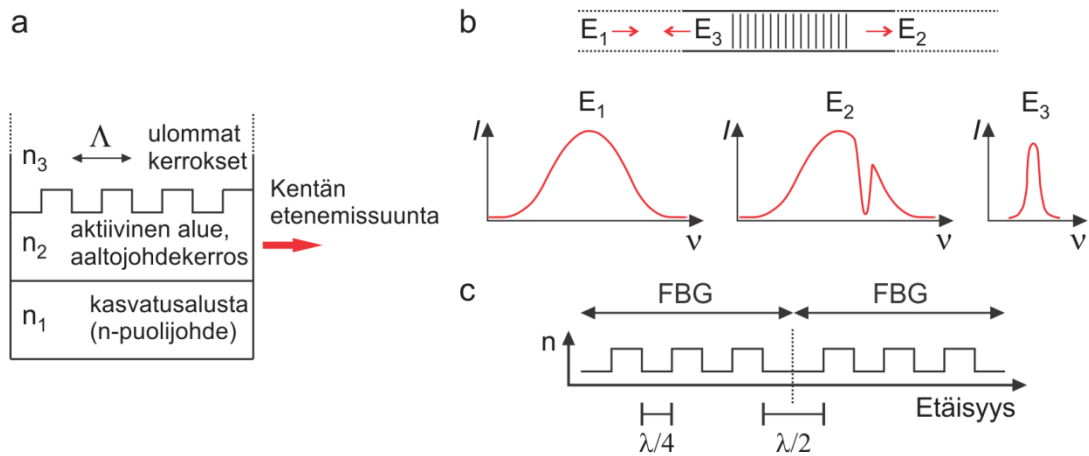
kytkennän heijastushäviöistä sekä kaviteetin muista häviöistä. Takaisinkytkentä voidaan rakentaa perinteisen Fabry-Perot –laserin tapaan kahdesta vastakkain asetetusta peilistä. Puolijohdelasereissa puolijohdemateriaali-ilma –rajapinta tarjoaa usein riittävän takaisinheijastuksen. Haluttaessa kapeampaa viivanleveyttä laserkiteen päätyihin voidaan asettaa DBR-elementit (engl. Distributed Bragg Reflector). DBR-rakenne voidaan myös valmistaa vahvistavan aineen sisään, kuten on tehty DFB-laserissa (engl. Distributed FeedBack). DFB-laserissa takaisinheijastuminen ei tapahdu vain kaviteetin päissä, vaan tasaisesti koko kaviteetin pituudelta. Heijastuminen johtuu jaksollisesta väliaineesta aivan samalla tavalla kuin edellä käsitellyssä AOM:ssa. DFB-kaviteetin aktiivisessa kerroksessa taitekerrointa on paikallisesti moduloitu kuvan 5.4 a esittämällä tavalla. Rakenne on takaisinpäin heijastava vain hyvin kapealla aallonpituuskaistalla keskusaallonpituuden λ ympärillä. λ on yhteydessä taitekerroinmodulaation avaruudelliseen jaksoon Λ edellisessä kappaleessa esitetyn Braggin lain kautta. Nyt valon kohtauskulma on 90° , jolloin yhtälö 35 supistuu muotoon

$$\Lambda = l \frac{\lambda}{2n_{ef}}, \quad (37)$$

missä n_{ef} on resonaattorin efektiivinen taitekerroin. Kenttä, jonka aallonpituus poikkeaa keskusaallonpituudesta tai jonka resonointisuunta poikkeaa kaviteetin akselin suunnasta, kokee näin ylimääräisen häviön. Laser ikään kuin pakotetaan jakson Λ valinnalla laseroimaan tietyllä taajuudella edellyttäen vahvistinaineen tarjoavan vahvistuksen tälle taajuudelle. Suurimman vahvistuksen saanut aaltomuoto pakottaa heikommat muodot laserointikynnyksen alapuolelle. DFB-lasereita kutsutaankin yleisesti yksimuotolasereiksi ja niiden taajuusvakaas on ylivoimainen Fabry-Perot –puolijohdelasereihin verrattuna. [82]

Taitekerroinmodulaatio voidaan valmistaa myös optiseen yksimuotokuituun. Tällaista muutamista millimetreistä muutamiin senttimetreihin pitkää kuidun palasta kutsutaan FBG:ksi (engl. Fiber Bragg Grating). Jaksollinen rakenne saadaan aikaan altistamalla kuidun ydin UV-laserilla tehdylle interferenssikuviolle. Ydin voi tätä ennen olla vety- tai fosforirikastettu kemiallisen reaktion herkkyyden parantamiseksi. FBG:n toimintaa on havainnollistettu kuvassa 5.4 b. FBG voi toimia esimerkiksi kuitulaserin resonaattorissa osittain läpäisevänä päätypeilinä. Yleinen sovellus on FBG-elementin asentaminen noin metrin päähän kuitukytketystä monimuotolasersirusta. Sen tarkoitus on vakauttaa laserin ulostulotaajuutta. Menetelmässä ohjataan siis tarkoituksella osa laserin säteilystä takaisin puolijohdelaserin kaviteettiin. Laseroinnin voidaan yksinkertaistettuna ajatella tapahtuvan lasersirun takapeilin ja FBG:n välillä. Osa valmistajista myy tällaista tuotetta FBG-laser tuotenimellä. FBG-lasereita voidaan joissain yhteyksissä kutsua myös yksimuotolasereiksi, mutta niiden ominaisuudet eivät yllä DFB-laserien tasolle. Niitä käytetään sovelluksissa, joissa tavoitellaan halvalla tuotettua suurta spektristä tehoa. Tyypillinen käyttökohde on kuituvahvistimien aktiivisen kuidun optinen pumppaus. Optisessa tiedonsiirtojärjestelmässä kahdesta FBG-elementistä voidaan val-

mistaa taloudellinen Fabry-Perot –aallonpituussuodin lisäämällä elementtien väliin kuvan 5.4 c mukainen kaviteetti. [86]



Kuva 5.4 DFB- ja FBG-rakenteet ja toiminta

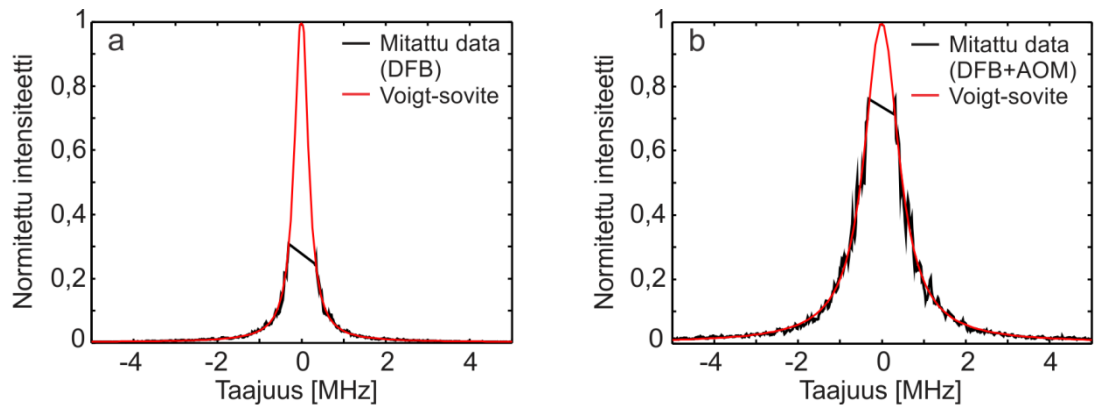
- a) Yksinkertaistettu kaaviokuva DFB-rakenteesta. Kuvassa $n_2 > n_1, n_3$.
 b) Yllä: Kuidun poikkileikkaus. FBG-elementti on muutaman sentin pituinen kuitupala. Alla: E_1 on alkuperäinen, E_2 FBG:n läpäissyt ja E_3 heijastunut kenttä. Periaatespektreissä I merkitsee intensiteettiä.
 c) FBG-aallonpituussuotimen taitekerroinrakenne.

Valmiit puolijohdelaserkit asennetaan tyypillisesti metallikoteloon. N-materiaali on tyypillisesti vasten kotelon pohjaa ja sähköinen kontakti istutetaan p-materiaaliin. Suuritehoisissa lasereissa suositaan 14-kytkentänastaisia perhoskoteloja, jossa nastat osoittavat sivulle, perinteisen DIL-kotelon (engl. Dual In-Line package) sijaan. Konfiguraatio mahdollistaa lämmön johtumisen suoraan kotelon pohjan läpi, josta se voidaan edelleen kuljettaa pois asianmukaisella jäähdytyksellä. Perhoskotelon kytkentänastojen lukumäärä mahdollistaa myös laserin tuottamaa optista tehoa monitoroivan fotodiodin ja lämpöä sähkövirran avulla siirtävän Peltier-elementin asennuksen pakkauksen sisälle.

Kuituoptisissa tietoliikennejärjestelmissä signaalien taajuudet noudattavat yleisesti Kansainvälisen televiestintäliiton (ITU) laatimaa taajuuskanavaverkostoa. Useiden tietoliikennekanavien taajuuksille on siksi saatavilla massatuotettavia DFB-puolijohdelasereita huomattavasti edullisemmin kuin mielivaltaiselle taajuudelle tilaustyönä tehtynä. DWDM (engl. Dense Wavelength Division Multiplexing) ITU-T (engl. International Telecommunication Union Standardization Sector) G.694.1 taajuusverkostossa kanavien väli on 100 GHz ja kanavat ovat aallonpituusvälillä 1519,48 – 1577,03 nm. Vaikka kanavia ITU-verkossa on täten 73 kappaletta ja niiden aallonpituusväli on vain noin 0,8 nm, monet laserdiodivalmistajat valmistavat lasereitaan vain alle kymmenelle eri kanavalle. DFB-lasereiden viivaprofiilin keskusaallonpituuden yhdistetty virta- ja lämpötilaviritettävyys on tavallisesti noin 1 nm suuntaansa.

Heterodyyni-detektion vaatimukset lähettävälle laserille ovat korkeat, kuten kappaleessa 4.2 todettiin. Tässä työssä rakennetussa LIDAR-laitteessa käytettiin kuitukytkettyä polarisaation pitävää DFB-laseria (AA1406-sarja, EM4 Inc.), jonka ITU-verkon mukainen keskusaallonpituus on 1538,17 nm. Sen optinen 100 mW teho on suuri ka-

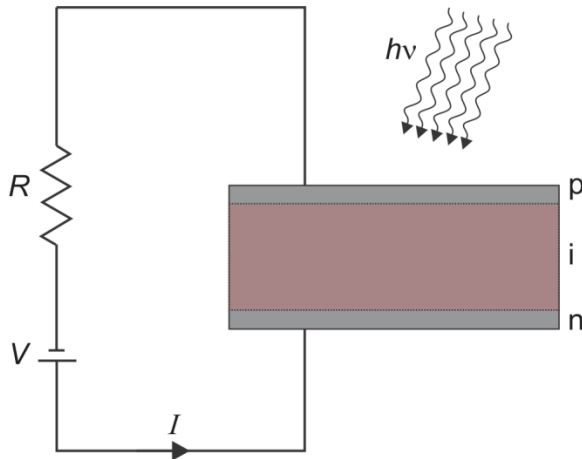
peaviivaisen DFB-laserin tuottamaksi. Viivanleveydeksi mitattiin 370 kHz, joka on so-
piva tuuli-LIDAR -sovellukseen. Viivaprofiili on esitetty kuvassa 5.5 a. DFB-laserin
RIN gigahertsien taajuusalueella on alle -150 dB/Hz. Kuituvahvistimen pumppulaserien
laatuvaatimukset eivät ole yhtä rajoittavia. Vahvistimen ensimmäiseen vahvistinaste-
eseen hankittiin taloudellinen 300 mW yksimuotoinen FBG-laser (Lumics GmbH) ja
toiseen hyvin suuritehoinen 10 W monimuotopuolijohdelaser (IPG Photonics Corp.).
Kuituvahvistimen rakennetta selvitetään kappaleessa 5.6. Sekä DFB- että FBG-laser
ovat perhoskoteloituja.



Kuva 5.5 Tässä työssä käytetyn DFB-laserin viivanleveys. Mittaukset suoritettiin ho-
modyynilaitteistolla, jossa lasersäde sekoitetaan viivästyneen versionsa kans-
sa. Huojuntaspektrit tallennettiin spektrianalysointilaitteilla (Rohde & Schwarz
FSV3).

- a) EM4 DFB-laserin mitattu viivaprofiili ja mittausdataan sovitettu Voigt-
käyrä. Sovitteen puoliarvonleveys on 370 kHz.
b) Sama toistettu AOM:n ulostulosta, kun AOM:a ajetaan jatkuvatoimisesti.
Tällöin viivanleveydeksi saatiin 980 kHz.

Myös valodetektorin toiminta perustuu pn-liitokseen. Puolijohdelaseriin verrattuna
se kuitenkin toimii käänteisessä järjestyksessä muuttaen aikariippuvaisen optisen sig-
naalin sähköiseksi signaaliksi, eikä se tarvitse kaviteettia. Tyhjennysalueelle absorboi-
tuneet fotonit virittävät elektroneja johtavuusvyölle eli luovat elektroni-aukko -pareja.
Tyhjennysalueen sähkökenttä kuljettaa elektronit n-puolelle ja aukot p-puolelle. Liitok-
sen materiaalit ovat kevyesti rikastettuja, jotta fotoneja keräävä tyhjennysalue olisi le-
veä. Toisaalta liian leveä tyhjennysalue hidastaa detektorin vasteaikaa, koska varauk-
senkuljettajilta kestää kauemmin ajautua liitoksen vastakkaisille puolille. Yleinen tapa
tyhjennysalueen leveyden säätämiseen on tehdä p-i-n valodetektor, jota on havainnol-
listettu kuvassa 5.6. Siinä n- ja p-materiaalien väliin on epitaksiaalisesti valmistettu kor-
kearesistiivinen itseispuolijohdekerros. Kun liitoksen yli kytketään estosuuntainen esi-
jännite, jossa n-alueella on korkeampi potentiaali kuin p-alueella, potentiaaliero syntyy
lähes muuttumattomana i-alueen vastakkaisiin päihin. Lisäksi itseispuolijohdekerroksessa va-
raustenkuljettajien elinikä on pitkä verrattuna ajautumisaikaan, jolloin ohuet n- ja p-
alueet keräävät suurimman osan fotonien aiheuttamista varaustenkuljettajista.



Kuva 5.6 Periaatekuva estojännitteisesti biasoidusta p-i-n valodetektorista. [83]

Kerättyjä varaustenkuljettajia suhteessa detektoriin saapuvien fotonien määrään kuvaa detektorin kvanttihyötysuhde η_{det} :

$$\eta_{det} = \frac{i_{sig}/e}{P_{sig}/hv}. \quad (38)$$

Suurin mahdollinen kvanttihyötysuhde on 1. Kvanttihyötysuhde voidaan ilmoittaa myös herkkyyslukuna, jonka yksikkö on A/W. [83]

Jos valodetektorin estojännite on hyvin suuri, elektronit ja aukot saavat huomattavan määrän liike-energiaa tyhjennysalueen sähkökentässä. Seuraa ionisoivia törmäyksiä varaustenkuljettajien ja puolijohdehilan kanssa, mikä saa aikaan suuren joukon uusia elektroni-aukko –pareja. Signaali vahvistuu ja detektorin virta ylittää kaavan 38 määräämän maksimiarvon. Mekanismeja kutsutaan vyöryläpilyönniksi ja tällä periaatteella toimivia valodetektoreita APD-detektoreiksi (engl. Avalanche Photo Diode). Ne ovat hyödyllisiä erittäin pienitehoisten optisten signaalien havainnoinnissa ja yleisiä kuituoptisissa järjestelmissä. [83]

Edellä kuvatut detektorit ovat herkkiä vain fotoneille, joiden energia on yhtä suuri tai hieman suurempi kuin itseispuolijohdekerrosmateriaalin vyörajo. Jos fotonien energia on liian suuri, ne absorboituvat puolijohdesirun pinnalle pääsemättä i-kerrokseen. Energian ollessa vyörajoa pienempi fotonit eivät absorboidu, koska niiden energia ei riitä elektroni-aukko –parin luomiseen. Valodetektorit siis valmistetaan erikseen eri aallonpituusalueille, kuten laserien yhteydessä mainittiin. Esimerkiksi tietoliikennetekniikassa käytetyn 1,55 μm aallonpituusalueen detektori valmistetaan InP-kiteen päälle InGaAs-yhdisteestä, jossa indiumin mooliosuus on 53 ja galliumin 47 %. [83]

Rakennetussa LIDAR-laitteistossa käytetään kuitukytkettyä InGaAs p-i-n valodetektoria (DET01CFC, Thorlabs), jonka herkkyysluku 1538 nm aallonpituudella on 0,95 A/W ja vasteaika 100 ps. Detektorin pimeävirta on 0,7 nA. Sen kaistanleveys 1,2 GHz ylittää reilusti laitteiston vaatiman noin 150 MHz kaistanleveyden.

5.6 Erbium-rikastettu kuituvahvistin

LIDAR-laitteiston lähettävässä haarassa on peräkkäin laser, isolaattori ja säteenjakaja sekä AOM, joka katkoo jatkuvatoimisen lasersäteen pulssimaiseksi. Pulssien huipputeho on akusto-optisen modulaattorin jälkeen 20–40 mW. Se poikkeaa teoreettisesta yli 90 mW arvosta johtuen AOM:n ja muiden komponenttien kytkentähäviöistä. 300 m mittausmatkalle teho on riittämätön, jolloin lähetettävää sädetä tulee vahvistaa. Kuituvahvistimien käyttö on arkipäivää nykyaikaisessa tiedonsiirtoverkossa. Ne ovat suurimmalta osalta optisia komponentteja, eivätkä vaadi monimutkaista tai nopeaa elektronikkaa. Signaalia ei havaita ja lähetetä uudelleen, vaan se vahvistuu useita kertaluokkia kulkiessaan vahvistimen läpi. [72]

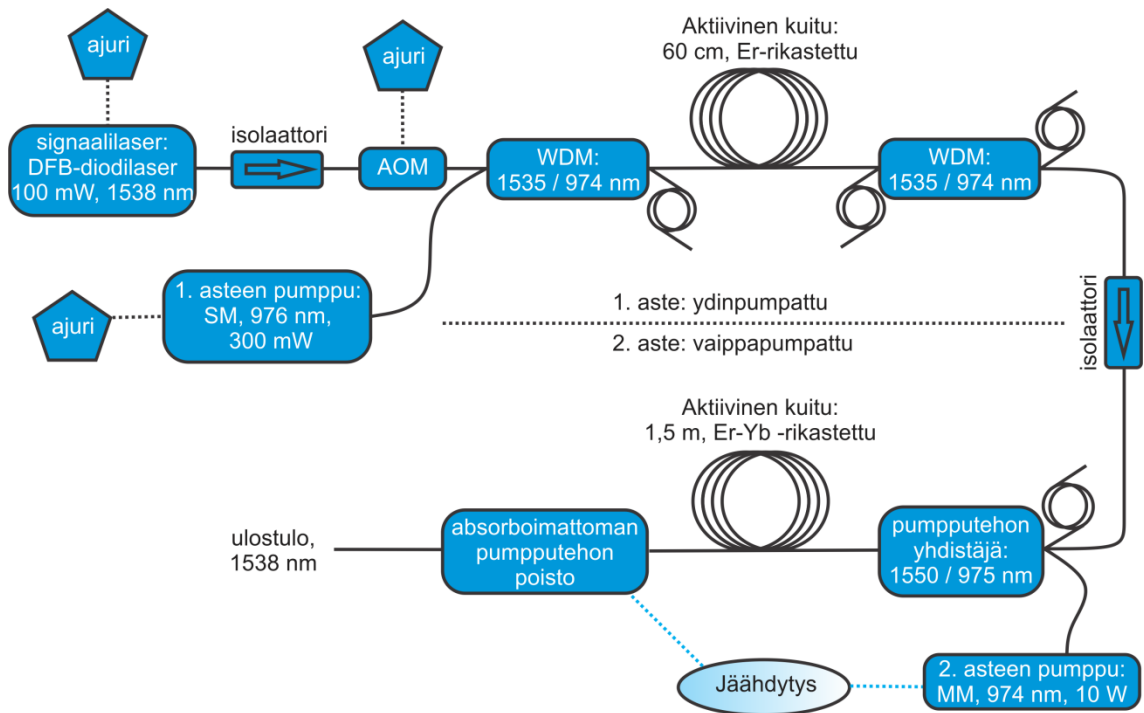
Aktiivisiksi kuiduiksi kutsutaan kuitua, jonka ydin on rikastettu harvinaisten maametallien ioneilla. Erbium, Er^{3+} , on käytetyin alkuaine tietoliikennevahvistimissa, mutta mahdollisia ioneja eri aallonpituusalueille ovat myös Nd^{3+} , Yb^{3+} , Tm^{3+} , Pr^{3+} ja Ho^{3+} . Rikastusprosessi ei suuresti eroa kappaleessa 5.1 kuvatussa. Taitekertoimen säätelyalkuaineet ovat helpommin haihtuvia kuin harvinaiset maametallit. Yleinen tapa onkin toimittaa maametalli-ionit kuumaan reaktiohöyryyn aerosolimuodossa, jolloin niitä ei tarvitse erikseen höyrystää. Käytetty alkuaine valitaan kuidussa kulkevan signaalitaajuuden perusteella. Valittu maametalli absorboi valoa lyhyemmällä aallonpituudella kuin kuidussa kulkevan signaalilaserin aallonpituus. Maametalli-ioneja viritetään erillisellä pumppulaserilla. Sekä signaali- että pumppulaser ovat tavallisesti puolijohdelasereita, joista signaalilaser on pienitehoisempi ja kapeaviivaisempi. Pumpputeho virittää maametallit epästabiilille energiatilalle, jolloin aktiivinen kuitu muuttuu signaalisäteelle vahvistavaksi väliaineeksi. Vahvistus tapahtuu stimuloidun emission kautta aivan kuten laserkaviteetissakin. [72] Suurin osa viritetyistä maametalliatomeista ehtii palaamaan alemmalle energiatilalle laserpulssin aikana. Pulssin takareuna ei tällöin koe yhtä voimakasta vahvistusta kuin etureuna. Tämä on otettu huomioon diplomityön laitteistossa, jossa vahvistimeen syötetään aikaprofiililtaan lievästi takapainoisia pulsseja, jolloin ulostulossa havaitaan symmetrisiä pulsseja.

Monia eri kytkentöjä käytetään pumppusäteen, aktiivisen aineen ja signaalisäteen yhteen tuomiseksi. LIDAR-tutkimukseen rakennetussa kuituvahvistimessa on käytetty kahta eri tapaa. Ensimmäisessä vahvistinasteessa pumppu ja signaalisäde yhdistetään saman yksimuotokuidun ytimeen WDM-komponentilla. Samanlaista komponenttia käytetään aktiivisen kuidun jälkeen eri aallonpituuksien erottamiseen toisistaan, sillä pumpputehosta saadaan vain osa absorboitumaan maametalliatomeihin. Toisessa vahvistinasteessa aktiivisena kuituna käytetään kaksoisvaippakuitua, jossa rikastetun yksimuotoytimen ympärillä on monimuotokuitukerros eli sisempi vaippa. Monimuotokerroksen päällä on ulompi vaippa ja suojakerrokset. Signaalin kulkiessa ytimessä pumpputeho tuodaan sisempään vaippaan. Rikastettu ydin absorboi valoa ja pitää näin vahvistusprosessin käynnissä. Jotta ytimen absorptio saadaan maksimoitua, sisemmän vaippakerroksen poikkileikkaus ei ole ympyrä vaan usein suorakaiteen muotoinen tai jopa epäsymmetrinen. Absorboimaton pumpputeho saadaan tässä menetelmässä poistet-

tua kohdassa, jossa aktiivinen kuitu on sulatettu kiinni tavalliseen yksimuotokuituun. Vaipan ympäriltä kuoritaan suojakerrokset pois ja kuitu upotetaan tämän jälkeen liimaan, jonka taitekerroin vastaa vaipan taitekerrointa. Tällöin vaipassa vielä oleva pumpputeho karkaa ympäröivään väliaineeseen, mutta signaali jatkaa vahvistettuna kuluaan kuidun ytimessä. [72]

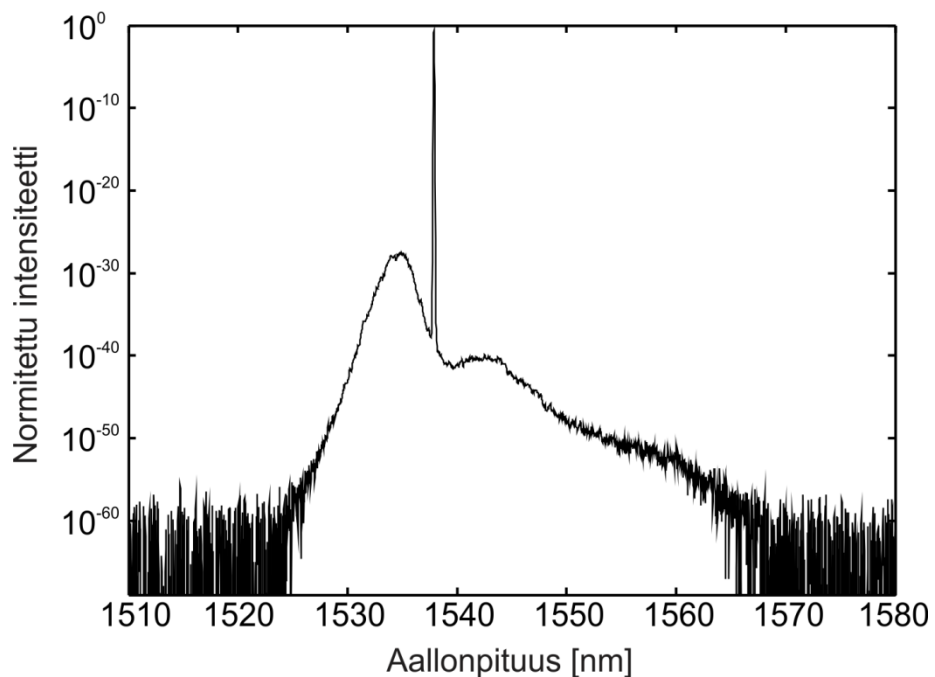
Kaupallisia tietoliikennekuituvahvistimia ei ole suunniteltu säilyttämään kapeaa viivanleveyttä suurilla pulssin huipputehoilla. Niissä aktiivinen kuitu saattaa olla useita metrejä pitkä. Yhdessä suuren spektrisen tehotiheyden ja suuren vahvistuksen kanssa tällainen rakenne herättää epälineaarisia ilmiöitä, joista tavallisin on stimuloitu Brillouin sirona (SBS). SBS syntyy kun voimakas sähkökenttä saa eristeessä kuten optisessa kuidussa aikaan mikroskooppisia muodonmuutoksia. Syntyy hilavärähtelyjä, joita voidaan kuvata fononi-hiukkaskäsitteen avulla. Lasersäteen fotonien törmätessä näihin akustisiin fononeihin, osa fotoneista siroaa. Siroamisessa fotonien taajuus muuttuu Doppler-siirtymän seurauksena suunnan muutoksen lisäksi. Vahvistustehon ylittäessä kriittisen raja-arvon, kuidun ulostulossa havaitaan tällöin Doppler-levennyt ja vaimentunut signaali. [87,88]

Koska signaalisäteen spektrin leventyminen ei ole heterodyyni-laitteistossa suotavaa, TTY:n Optoelektroniikan tutkimuskeskuksessa suunniteltiin detektiomenetelmän vaatimukset täyttävä kuituvahvistin. Vahvistin koottiin TTY:n Optiikan laboratoriossa ja komponentit hankittiin yhteisesti. Kuva 5.7 esittää vahvistimen rakenteen. Signaalilaser ajureineen, isolaattori ja AOM eivät kuulu tutkimuksessa rakennettuun vahvistimeen. Ne ovat lisätty kuvaan selkeyden vuoksi. Vahvistimessa on kaksi osaa, joista ensimmäinen on ydin- ja jälkimmäinen vaippapumpattu. Ensimmäisen osan pumppulaser on yksimuotoinen FBG-laser (LU0980M330, Lumics GmbH), jonka aallonpituus on 976 nm. 60 cm pitkä aktiivinen kuitu on erbiium-rikastettu (Nufern Inc.). Jälkimmäisen osan pumppu on suuritehoinen 974 nm kuitukytetty monimuotolaser (PLD-10-974, IPG Photonics Corp.) ja 1,5 m pitkän aktiivisen kaksoisvaippakuidun rikasteena on käytetty erbiium- ja ytterbiumioneja (MM-EYDF-12/130-HE, Nufern Inc.). Aktiiviset kuidut ovat voimakkaasti rikastettuja, jolloin niiden pituus pystytään säilyttämään lyhyenä. Vahvistustehon SBS-raja-arvo on vastaavasti korkealla ja signaalia on mahdollista vahvistaa voimakkaasti ilman spektraalista levenemistä. Kuituvahvistimen vahvistuskaistan keskiaallonpituus on 1535 nm. Signaali- ja pumppusäteiden yhdistäminen ja erotus ydinpumpatussa osassa tapahtuu WDM-komponenteilla ja vaippapumpatussa pumpputehon ja signaalin yhdistäjällä (TFB-550211B71, Gooch & Housego Plc.). Ennen vahvistinta laitteistossa on signaalilaseria voimakkaalta takaisinkytkennältä suojaava isolaattori. Takaisinkytkentä voisi paitsi vaurioittaa laseria myös leventää signaalin spektriviivaa. Myös vahvistinosien välillä on isolaattori, jolla estetään toisesta vahvistinasteesta ja vahvistimen jälkeen takaisinheijastuneen tehon vahvistuminen. Ilman isolaattoreita kuituvahvistimen sisälle saattaa syntyä laseroskillointia, joka lisää kohinaa ja saattaa vaurioittaa vahvistinta. Takaisinheijastuksien välttämiseksi kaikki kuituvahvistimen komponenttien kytkentäkuidut ovat yhdistetty toisiinsa sulattamalla ilman kuituliittimiä.



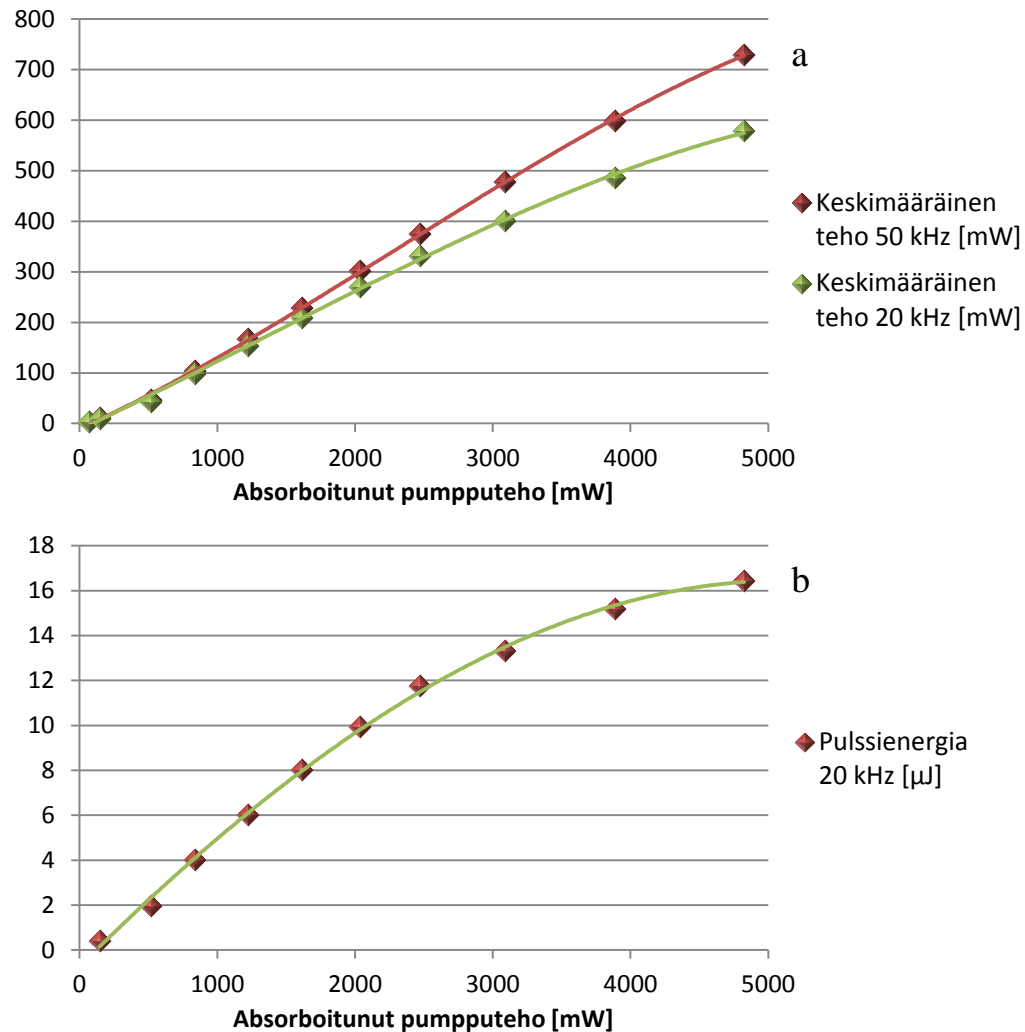
Kuva 5.7 LIDAR-laitteeseen räätälöidyn kuituvahvistimen osat kaavamaisesti esitettyinä.

Kuvassa 5.8 on vahvistimen ulostulopulssin spektri LIDAR-laitteiston käyttämällä signaalilaserilla. Jatkumosespektri 1538 nm viivan molemmin puolin on vahvistunutta spontaania emissiota (ASE), jota on käsitelty kappaleessa 4.1. Sen vaikutusta spektriin on kuvassa 5.8 korostettu tekemällä pystyakselista logaritminen. ASE ei ole rakennetussa vahvistimessa kaupallisia kuituvahvistimia merkittävämpää.



Kuva 5.8 LIDAR-laitteiston emittoivan pulssin matalaresoluutioinen spektri (Rohde & Schwarz FSV3 spektrianalysaattori).

Kuvissa 5.9 a ja b vahvistimen suorituskkyky on esitetty 100 ns pitkillä pulsseilla. LIDAR-laitteistossa käytetään 200 ns pulsseja ja 50 kHz toistotaajuutta. Ensimmäistä pumppulaseria ajetaan maksimivirralla ja vahvistusta säädetään muuttamalla toisen vahvistinasteen pumpun virtaa. Vahvistustehon SBS-raja-arvon todettiin olevan kohdassa, jossa jälkimmäistä pumppua ajetaan maksimivirran puoliarvolla. Tuotettavien pulssien energia on tällöin 6-8 μJ ja niiden huipputeho on 30-40 W. Vahvistin tarjoaa täten yli 30 dB vahvistuksen.



Kuva 5.9 Kuituvahvistimen tarjoama ulostuloteho pumpputehon funktiona.

a) Vahvistimen keskimääräinen ulostuloteho ja

b) pulssienergia optisen pumppauksen funktiona.

LIDAR-laitteistossa vahvistinta käytetään käyrien lineaarisella osalla, jotta Brillouin sironnan synty vältettäisiin.

5.7 Lähetin-vastaanotin

Lähetinoptiikka kollimoi tai fokusoi kuidun päästä divergoivan säteen taivaalle. Vastaanotin kerää oikeassa avaruuskulmassa siroavat fotonit ja ohjaa niistä mahdollisimman suuren osan yksimuotokuituun. Diplomityön laitteessa ei ole erillistä optiikkaa lähetykselle ja vastaanotolle, vaan ne kulkevat samalla optisella akselilla yhteisen lähetin-vastaanottimen kautta. LIDARin sanotaan tällöin olevan monostaattinen. Jopa lähtevän ja tulevan valon kuidut ovat samoja. Signaalit erotetaan myöhemmin sirkulaattorissa eri kuituhaaroihin.

Ideaalisen säteen kulkiessa ideaalisen optisen järjestelmän halki aaltorintama lähtöaukon kohdalla on pallopintainen. Esimerkiksi yksimuotoisen laserin ulostulosäde on hyvin lähellä ideaalista sädettä. Poikkeavuuksia tästä Gaussisen optiikan tapauksesta kutsutaan aberraatioiksi. Aberraation suuruutta mitataan aallonpituuksien lukumäärällä, jotka mahtuvat ideaalisen aaltorintaman ja todellisen aaltorintaman maksimipoikkeaman väliin. Jokaisessa todellisessa optiikassa on aberraatioita, vaikka niitä voidaanakin pienentää rajatta peilien ja linssien tarkalla tietokonesuunnittelulla ja hionnalla. Aberraatiot jaetaan käytettävän valonlähteen mukaan monokromaattisiin ja kromaattisiin aberraatioihin. Jälkimmäiset johtuvat optiikan taitekertoimen aallonpituusriippuvuudesta, eivätkä täten kosketa lasersovelluksia. Monokromaattisista aberraatioista tärkeimmät ovat Seidelin viisi aberraatiota, joista vain yksi eli palloaberraatio esiintyy järjestelmän keskiakselilla. Se aiheuttaa valon liian voimakkaan taittumisen optiikan reuna-alueilla, jolloin kuva tai fokus sumentuu. Vaikka aberraatiot poistuisivat, jäljelle jäisi valon diffraktiosta johtuva epätarkkuus. Teoreettinen raja sille, kuinka pieneksi pyöreäaukkoisen teleskoopin tai kameran täydellinen optiikka voi valon fokusoida on Airyn kiekko. Airyn kiekon interferenssikuviossa on kirkkaita samankeskisiä renkaita keskimaksimin ympärillä. Kirkkaiden renkaiden välissä on pimeitä renkaita, joiden keskellä intensiteetti on destruktiivisesta interferenssistä johtuen nolla. Ensimmäisen minimi-intensiteetin renkaan sisään jää 84 % interferenssikuvion valosta. Sen halkaisija on

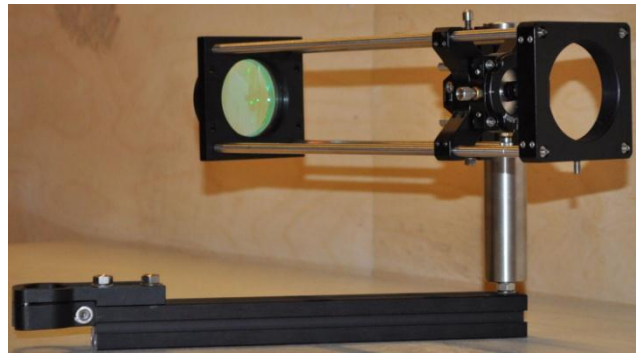
$$d_{\text{Airy}} = 2,44 \frac{\lambda f}{D}, \quad (39)$$

missä f on järjestelmän polttoväli ja D tuloaukon halkaisija. Optinen järjestelmä, jonka resoluution rajoittavin tekijä on diffraktio eikä optiikan epätäydellisyys, sanotaan diffraktio-rajoitetuksi. [89] Kuitukytetyssä LIDAR-laitteistossa on tärkeää olla diffraktio-rajoitettu lähetin-vastaanotin –optiikka ja lasersäde, jotta huomattavat signaalinmenetykset vältetään.

Suurempi aukkorajoitin eli useassa tapauksessa käytettävän optiikan koko kerää valoa suuremmassa avaruuskulmassa. Talteen jää siis enemmän fotoneja ja yhtälön 39 mukaan polttopiste pienenee. Ongelma toimivan lähetin-vastaanotin -optiikan suunnittelussa on kuitenkin monimutkaisempi. Alaa, jonka muoto täyttää yksimuotokuidun poikileikkauksessa kutsutaan MFD:ksi (engl. Mode Field Diameter). Se on tyypillisesti 1–2 μm ytimen halkaisijaa suurempi. Suurin mahdollinen kulma, jolla optinen järjestelmä

voi emittoida valoa tai jolla valoa voidaan tuoda järjestelmään, on järjestelmän numeerinen aukko NA. MFD ja NA tulee ottaa huomioon lähetin-vastaanottimen suunnittelussa. Vastaanottimessa optiikan täytyy kyetä fokusoimaan valo MFD:n kokoiseksi, koska ulkopuolelle jäävä teho ei herätä kuituun muotoa. Optiikan on oltava siis diffraktio-rajoitettua. Valon pitää myös saapua ytimeen yhtä suuressa tai pienemmässä kulmassa kuin NA, jotta kaikki teho kytkeytyisi kuituun. Tämä kulma ei kuitenkaan saa olla liian pieni, jotta Airyn kiekon keskimaksimi ei kaavan 39 mukaisesti kasva MFD:tä suuremmaksi. Monostaattisessa LIDARissa liian pitkä polttoväli aiheuttaa myös tehohäviöitä lähtevässä säteessä. Tällöin lähettävä optiikka ei kerää kaikkea kuidusta taivaalle lähtevää säteilyä. Optimaalinen konfiguraatio voidaan toteuttaa järjestelmän aukkorajoittimen halkaisijan ja polttovälin oikealla valinnalla.

Laitteistossa on kaksi vaihtoehtoista lähetin-vastaanotinta, joista toinen on peili- ja toinen linssioptinen. Valokuvat lähetin-vastaanottimista ovat kuvassa 5.10.



Kuva 5.10 Vasemmalla: Peilikaukoputki kuitukytkimineen. Oikealla: Linssioptinen lähetin-vastaanotin.

Molempiin on rakennettu kuitukytkentä, johon kuituliittimen saa asetettua millimetrin osien tarkkuudella. Kytkenässä on kuidunpään syvyysäättö, joka mahdollistaa säteen kollimoinnin ja fokusoinnin eri etäisyyksille ja xy-säättö kuidun paikan hienosäätöön. Kuituliittimenä käytetään tässäkin FC/APC-liitintä johtuen huomattavasti pienemmästä takaisinheijastuksesta lasi-ilma –rajapinnasta [90]. Liittimen 8° hionnan ja valon taittuisen lasin rajapinnasta vuoksi valo emittoituu FC/APC liittimestä 4° kulmassa kuidun akseliin nähden. Vaino lähetyskulma on otettu huomioon tarkkaan työstetyssä liitinpidikkeessä. Kytkentään tulevan yksimuotokuidun MFD on $10,4 \pm 0,8 \mu\text{m}$ ja NA 0,14.

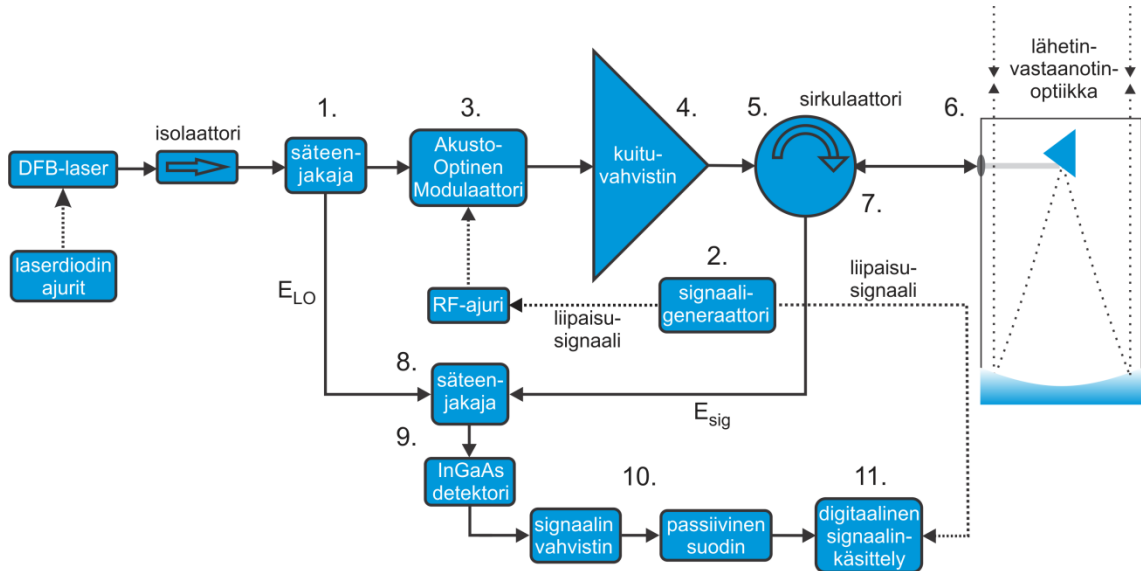
Peilioptiikassa käytetään kaupallista tähtikaukoputkea (Sky-Watcher Skyhawk 114/500, Pacific Telescope Corp.). Se on Newtonin peilikaukoputki, jossa ei ole valoa taittavia osia. Sen paraboloidisen primaaripeilin halkaisija on 114 mm ja se toimii teleskoopin aukkorajoittimenä. Paraboloidinen muoto vähentää palloaberratiota ja valmistaja lupaakin teleskoopin olevan diffraktio-rajoitettu. Sekundaarisen tasopeilin neljä

kiinnitintä on tehty erittäin ohuiksi rihmoiksi pienentämään diffraktion vaikutuksia. Peilit ovat alumiinipinnoitettuja, mikä mahdollistaa teleskoopin käytön niin IR-, näkyvän kuin UV-valonkin aallonpituusalueilla. Tähtikaukoputkeksi teleskoopin polttoväli, 500 mm, on poikkeuksellisen lyhyt. Sen ansiosta vain vähän lähetettävää valoa hukkuu primaaripeilin ulkopuolelle. Tutkittaessa Airyn kiekkoa teleskoopin polttotason etu- tai takapuolella sen keskellä näkyy pienemmän intensiteetin alue. Samanlainen keskivarjostuma on läsnä kaikissa Newtonin peilikaukoputkissa johtuen sekundaaripeilin paikasta primaaripeilin edessä. Se ei kuitenkaan merkittävästi vaikuta fokuksen kokoon, jos primaaripeiliä varjostavan pyöreän alueen halkaisija on alle 30 % primaaripeilin halkaisijasta [91].

Linssioptinen lähetinvastaanotin koostuu vain yhdestä akromaattisesta duplettilinsistä ja kuitukytkenästä. Yleisin akromaattinen dubletti muodostuu positiivisesta matalatekertoimisesta kruunulasilinssistä ja negatiivisesta linssistä, joka on tehty korkeatekertoimisesta piilasista [89]. Se on suunniteltu poistamaan kromaattinen aberraatio kahden toisistaan kaukana olevan aallonpituuden välillä. Niissä on kuitenkin myös palloaberraatio minimoitu, mikä tekee niistä singlettilinssejä paremman valinnan myös monokromaattisiin sovelluksiin. Laitteistossa olevan antiheijastuspinnoitteen linssin (AC508-250-C, Thorlabs) halkaisija on 50,8 mm ja sen polttoväli on 250 mm. Zemax-optiikkasuunnitteluohjelmalla laskettu aaltorintaman virhe kuvatasossa on 0,12 aallonpituutta, jolloin sitä voidaan pitää lähes diffraktiorajoitettuna.

5.8 Laitteiston toiminta

Kuva 5.11 esittää kuinka edellä käsitellyt komponentit ovat kytketty toisiinsa. Seuraavassa käydään vaiheittain läpi yksittäisen pulssin kulku laitteiston läpi ja sen aiheuttama tallenne digitaali-oscilloskoopin (WaveRunner 6100A, LeCroy Corp.) muistiin.

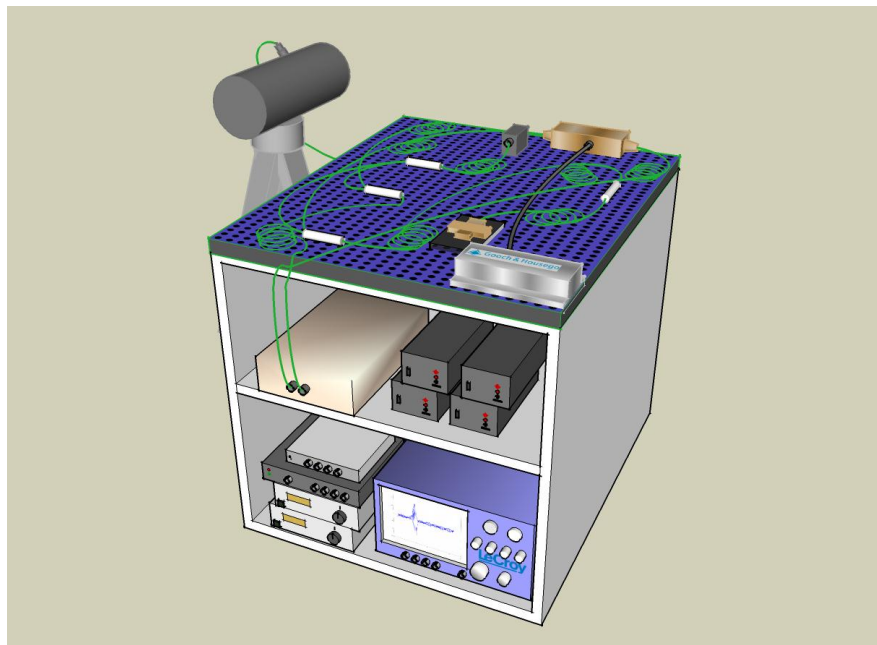


Kuva 5.11 Diplomityössä rakennetun heterodyyni-LIDAR -laitteiston kaaviokuva. Numerot kuvaavat alla lueteltuja toimintavaiheita.

1. Jatkuvatoimisen DFB-laserin tehosta erotetaan 1 tai 10 % LO-haaraan säteenjakajalla.
2. Signaaligeneraattori (ArbStudio 1104, LeCroy Corp.) lähettää AOM:n ajurille tiedon pulssin muodosta ja toistotaajuudesta. Samaan aikaan oscilloskoopille lähetetään liipaisusignaali ajan ottamisen aloittamiseksi.
3. AOM pilkkoo säteen 200 ns pulsseihin 50 kHz toistotaajuudella. Läpi päässyt kenttä on taajuudessa 80 MHz korkeammalla kuin LO-haaran kenttä.
4. Kuituvahvistin vahvistaa sädettä yli 30 dB ja suoristaa pulssin ajallisen profiilin. Vahvistimen jälkeen pulssin huipputeho on noin 40 W.
5. Sirkulaattori ohjaa säteen lähtevään haaraan kohti lähetin-vastaanotinta.
6. Pulssi lähtee matkaan. Edetessään ilmassa se sirottaa jatkuvasti valoa. Pieni osa tästä valosta saapuu takaisin lähetin-vastaanotin-optiikalle.
7. Osa kerätystä valosta yhdistyy samaan yksimuotokuituun. Sirkulaattori ohjaa kuvassa 5.11 vasemmalle kulkevan signaalin sironneen valon haaraan. Sironneen valon taajuus on laserin taajuuden, AOM:n poikkeutustaajuuden ja ilmakehässä koetun Doppler-siirtymän summa.
8. LO- ja signaalihaarat yhdistetään toisessa säteenjakajassa, jonka jakosuhte on 1/99. LO-säteen teho jakajan jälkeen on noin 300 μ W.

9. Säteet peittyvät toisensa päälle yhdistimen jälkeen olevassa yksimuotokuidussa. Syntyy radiotaajuinen huojuntasignaali, joka muutetaan sähköiseksi signaaliksi InGaAs-detektorissa.
10. Sähkösignaali vahvistetaan 25-kertaiseksi radiotaajuisen signaalin vahvistimessa (SR445, Stanford Research Systems Inc.). Vahvistettu signaali kulkee analogisen passiivisen suotimen läpi, jossa matalat taajuudet poistetaan.
11. Huojuntasignaalia tallennetaan $1,5\ \mu\text{s}$ ajan pulssin lähtöhetkestä alkaen oskilloskoopin muistiin.

Kun tuhat pulssia on tallennettu, data tallennetaan DAT-tiedostoksi oskilloskoopin tietokoneen muistiin. Laitteistoa ei vielä ole kehitetty reaaliaikaiseksi. Tuulitieto saadaan selville jälkikäteen käsittelemällä tallennettu DAT-tiedosto tarkoitukseen kirjoitetulla MATLAB-ohjelmalla.



Kuva 5.12 Liikuteltavalle alustalle rakennettu mittauslaitteisto. Kuvasta puuttuu sähkö- ja koaksiaalikaapeleiden lisäksi kannettava tietokone.

LIDAR-mittauslaitteisto on rakennettu liikuteltavan pöytälaatikoston sisä- ja ulkopuolelle kuvan 5.12 mukaisesti. Suurin osa optisista komponenteista on pöydän päällä optiseen tasoon kiinnitettyinä. Elektroniikka on sijoitettu laatikoston hyllyille. Peili-kaukoputki on laatikoston ulkopuolella oman tripodijalustansa päällä ja vaihtoehtoisen linssioptiikan voi kiinnittää laatikoston takapuolelle.

6 Laitteiston arviointi

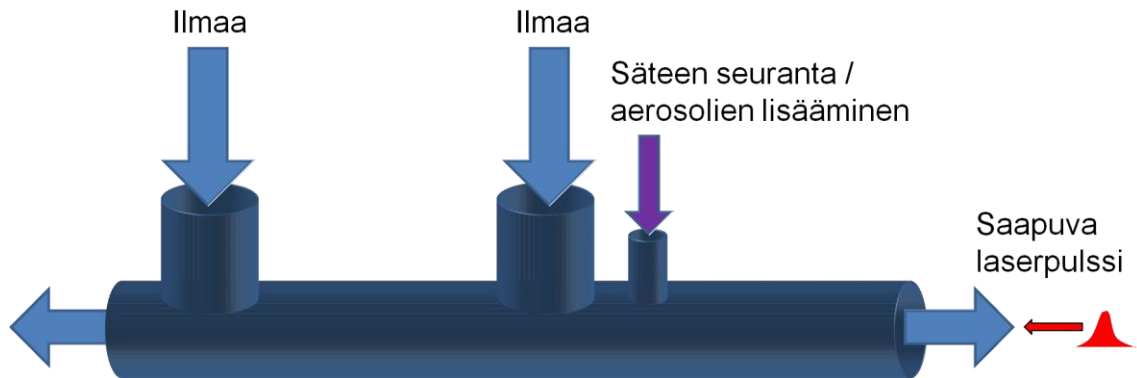
Doppler-siirtymän mittaamiseksi mittauksen kohteen tulee olla liikkeessä. Sisätilojen LIDAR-laboratoriomittauksesta tulee haastavaa, kun kohde on tuuli ja mittausmatka kymmeniä metrejä. Tuulen nopeus säteen suunnassa tulee lisäksi tietää LIDAR-laitteesta riippumattomalla menetelmällä. TTY:n Optiikan laboratoriossa rakennettiin nämä vaatimukset täyttävä mittausjärjestely. Sillä on mahdollista mitata tuulta kahteen vastakkaiseen suuntaan.

Tässä luvussa käsitellään tuuli-LIDARin arviointiin rakennettuja tuulimittausolosuhteita, alustavia mittauksia, laitteiston virhelähteitä ja ehdotuksia laitteiston suorituskyvyn parantamiseksi. Laboratoriokokeita tehtiin rakennetun mittauslaitteiston toimivuuden todentamiseksi, mutta laitteiston suorituskyvyn tarkemmat määrittäykset jätettiin diplomityön ulkopuolelle.

6.1 Mittausjärjestelyt

Rakennetulla tuuli-LIDARilla tehtäviä mittauksia varten mitattavien tuuliolosuhteiden tulee säilyä vakaina. Lisäksi tuulta tulisi kyetä säätämään ja mittaamaan luotetulla referenssimittalaitteella. TTY:n maanalaiseen väestönsuojaan rakennettiin tästä syystä lähes 30 m pitkä suora tuulitunneli Line-Of-Sight (LOS) -tuulen LIDAR-mittauksiin. Mittausjärjestelyllä tuulta kyetään mittaamaan kahteen suuntaan, jotka poikkeavat 180° toisistaan. Tunneli on rakennettu halkaisijaltaan 200 mm alumiinisesta ilmastointiputkesta, joka on asetettu vaakasuoraan telineiden päälle. Säde tuodaan putkeen kuvan 6.1 mukaisesti toisesta päästä. Laserpulssi joko matkaa tuuliputken läpi tai se törmäytetään vinon kartion muotoon tehtyyn, putken kauimmaiseen päähän asennettuun säteenvaimentimeen. Säteenvaimennin estää heijastuksien hallin takaseinästä sekoittumisen takaisinsirronneeseen signaaliin. Putken keskellä ja toisessa päässä on kanavat ilmavirran puhaltamiseksi tai imemiseksi. Ilmavirtauksen synnyttämiseen käytetään tehokasta kanavapuhallinta (Onnline CK 200 B, Onninen Oy), joka saavuttaa yli 1200 m³/h tilavuusvirran. Puhallintehoa voidaan säätää portaattomasti tyristorisäätimellä. Tasaisen virtauksen nopeutta tarkkaillaan kuumalankatermoanometrillä (GGA-65, Alnor Oy), joka tuottaa myös vertailutuloksen LIDAR-mittaukselle. Suurin mitattu tuulennopeus keskiakselilla on 13,5 m/s. Putken reunoilla tuulennopeus on noin 2 m/s keskiakselin arvoa pienempi. Putkessa on kanavia myös säteen kulun tarkkailuun tai sirottavien hiukkasten, kuten vesipisaroiden, virtaukseen tuomista varten. Hiukkasia voidaan myös lisätä ilmavirtaan suoraan puhallinkanavasta. Vesipisaroita tuotetaan lääkkeiden annostukseen käytettävällä sairaalasumuttimella eli ultraääninebulisaattorilla (NE-U17, Omron

Corp.). Siirtämällä puhaltimen paikkaa ja avaamalla ja sulkemalla eri kanavia tuulitunneliin voidaan luoda paikasta riippuva tuulennopeus. Ilmavirran suunta voidaan lisäksi kääntää keskellä putkea päinvastaiseksi. Ominaisuus mahdollistaa tuuli-LIDARin etäisyystarkkuuden eli paikkaresoluution määrittämisen. Puhallustehon portaattonta säätöä hyödynnetään puolestaan nopeustarkkuuden toteamisessa.



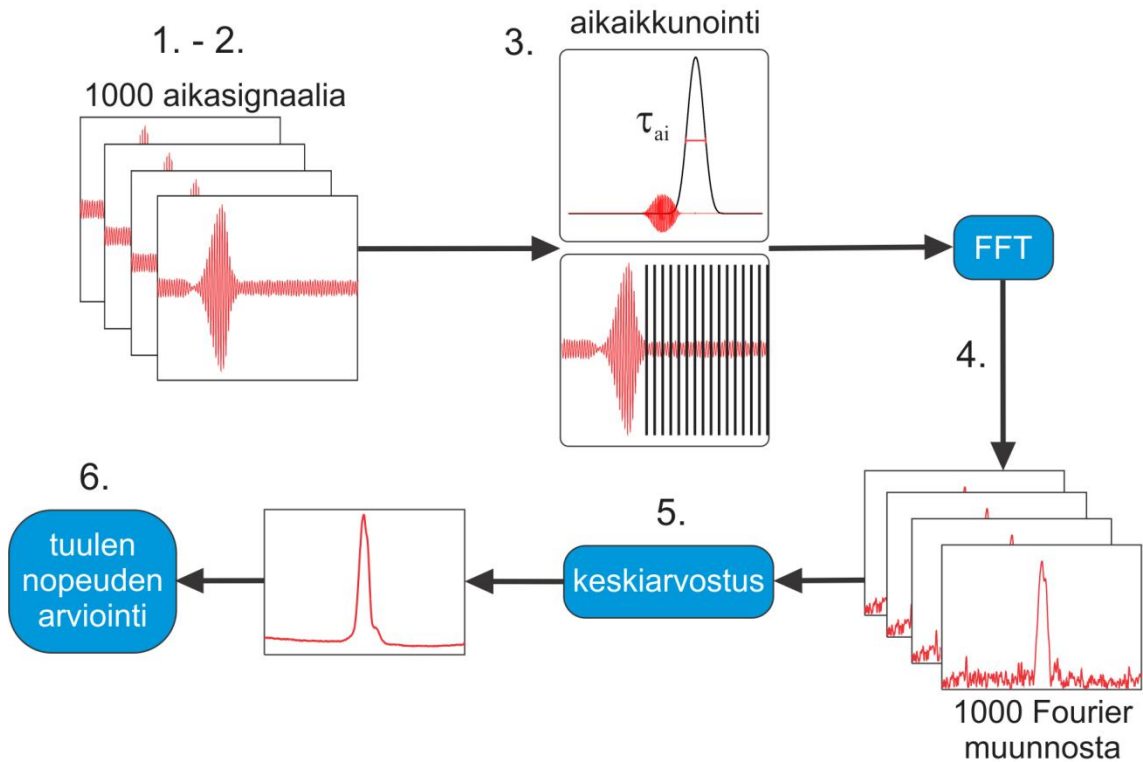
Kuva 6.1 LOS-tuulennopeuden tarkkaan LIDAR-mittaamiseen suunniteltu tuulitunneli.

Liikuteltava LIDAR-laitteisto on sijoitettu 15 m päähän tunnelin etuosasta. Suurin mitattava etäisyys mittaussäätelyllä on siis 45 m. Maksimietäisyyttä rajoittaa kallioon louhitun väestönsuojan puitteet. Ennen väestönsuojan tuomista LIDAR-laitteistoa koe-käytettiin Optiikan laboratoriossa. Laitteistolla mitattiin onnistuneesti kiinteiden kohteiden, kuten kaiutinelementin ja tuulettimen lapojen, nopeudet. Ennen tuulimittauksia LIDARin lähetin-vastaanottimien toiminta varmistettiin 10–45 m etäisyyksillä. Eri etäisyyksille asetettiin valkoista tulostuspaperyä, joka toimii kaikkiin suuntiin yhtä paljon heijastavana eli diffuusiheijastavana mattapintana. Säde fokuoitiin paperiin ja aikaisignaalisissa näkyvä, paperiheijastuksesta johtuva 80 MHz oskillointi optimoitiin säätämällä lähetin-vastaanottimien kuitukytken xyz-säätöä. Lisäksi ennen kutakin peilioptiikalla suoritettua tuulimittausta fokustason etu- tai takapuolelta tutkittiin varjostimelle syntyvää Airyn kiekkoa. Aberraatioiden välttämiseksi peiliteleskoopin keskivarjostuma säädettiin aivan Airyn interferenssikuvion keskelle.

Tuulennopeusmittauksissa yhtä tuuliolosuhdetta kohtaan nauhoitettiin signaalit 1000 pulssista. Tuulimittauksen jälkeen säteen keskimääräinen teho mitattiin eri mittausten vertailtavuuden vuoksi. Teholukemat ja käytetty tuuliolosuhde kirjattiin sähköiseen mittauspöytäkirjaan ja kaikki data tallennettiin DAT-tiedostoon jatkokäsittelyä varten. Tämän jälkeen ilmavirran nopeutta, suuntaa tai hiukkaskoostumusta muutettiin ja edellä kuvattu prosessi toistettiin.

6.2 Sirontasignaalin käsittely

Aikasignaalin jatkokäsittely toteutettiin jälkeinpäin laitteistosta erillään olevalla tietokoneella. Signaalinkäsittelyohjelma kirjoitettiin MATLAB-ohjelmistolla ja sen pääkohdat on esitetty kuvassa 6.2. Kaaviokuvan jälkeen on tarkempi kuvaus eri vaiheista.



Kuva 6.2 Signaalinkäsittelyohjelmalle annetaan syötteenä tuhhat aikasignaalia sisältävä DAT-tiedosto. Ulostulona saadaan keskiarvohuujuntaspektri ja arvio tuulen nopeudesta. Kuvassa esitetty aikaikkuna on Tšebyšev-muotoinen.

1. DAT-tiedostoista parsitaan jännitedata ja aikavektorit erikseen. Signaali kerätään matriisiin, jossa rivejä on yhtä monta kuin pulsseja.
2. Raakadatasta suodatetaan digitaalisesti pois taajuudet, jotka ovat taajuusikkunan 40–120 MHz ulkopuolella. Koska nollatuuli vastaa 80 MHz huojuntaa, suodatuksen vuoksi ohjelman ulostulossa tarkkaillaan vain alle 30,8 m/s olevia tuulia.
3. Aikadatasta ikkunoidaan halutun pituinen τ_{ai} ajanjakso. Tämä vastaa tuulitunnelissa sitä matkaväliä, jonka laserpulssi matkaa puolikkaan aikaikkunan aikana. Tätä on havainnollistettu kuvassa 3.3. Kerroin $\frac{1}{2}$ tulee laserpulssin laskostumisesta takaisin-sirontaprosessissa. Oletusarvoisesti ohjelma käyttää Tšebyševin muotoista ikkunaa, jonka puoliarvonleveys on 200 ns. Ohjelmalle voi myös antaa syötteenä halutun levyisen ikkunaa ja useimmat yleisemmin käytetyistä ikkunavaihtoehdoista. Näitä ovat muun muassa suorakulmainen (top-hat), Hamming, Gauss, Blackman-Harris ja litteän (flat top) –muotoiset ikkunat.

4. Ikkunoidulle aikasignaalmatriisille tehdään diskreetti Fourier-muunnos FFT-algoritmillä (engl. Fast Fourier Transform). Tuloksena on matriisi, jonka tuhat riviä esittää vastaavista pulsseista huojunnan taajuustiedon. Huojuntaspektri aiheutuu nyt vain määrätyllä aikavälillä saapuneista fotoneista.
5. 1000 Fourier muunnosta keskiarvostetaan. Yksittäinen taajuusspektri on kohinainen ja spektrien välillä on merkittäviä eroja. Keskiarvostuksella pyritään kasvattamaan tuulennopeudesta johtuvan taajuuspiikin SNR:a.
6. Tuulen nopeusarvo saadaan havaitun spektriviivan keskitaajuuden ja 80 MHz:n erotuksen itseisarvosta. Erotuksen merkki, positiivinen tai negatiivinen, kertoo oliko tuuli LIDAR-laitetta lähestyvä vai laitteesta loittoneva.

Kohdan 3 aikaikkunointi, yhdessä laserpulssin pituuden kanssa, määrää laitteiston paikkaresoluution. Ilman kehittyneempää signaalinkäsittelymenetelmää etäisyyden erottelukykyä ΔR ei saada laserpulssin pituuden puoliarvoa lyhyemmäksi. Erottelukykyyn kaava on esitetty taulukossa 4.1.

Aikaikkunan lyhentämisellä on päinvastainen vaikutus tuulen nopeuden määrittämisen tarkkuuteen. Ikkunointi lyhentää signaalia, jolloin myös Fourier-muunnoksen pisteitiheys laskee. Taajuuspiikkien keskitaajuutta on tällöin vaikea määrittää, koska piikit muodostuvat harvasta pisteestä ja murtoviivoista pisteiden välillä. Huippukohta on tavallisesti leikkautunut pois. Pisteiden väliä taajuusspektrissä voidaan laskennallisesti interpoloida jatkamalla eli ekstrapoloimalla aikasignaalia ikkunan ulkopuolella. Koska ikkunafunktio lähestyy nollaa ikkunan reunoilla, voidaan ekstrapolointi toteuttaa vain lisäämällä nollia ikkunan molemmille puolille. Nollavektoreiden pituus voi olla monta kertaa ikkunan pituus, kunhan tietokoneen muisti kykenee käsittelemään datamäärää yhdellä kertaa. Menetelmää kutsutaan nollatäytöksi (engl. zero-padding). Se parantaa tiettyyn rajaan asti nopeustarkkuutta, mutta ei luo spektriin uutta hienorakennetta. Taajuusresoluutio paranee vain leventämällä ikkunaa tai lisäämällä pisteitä ikkunan sisällä eli kasvattamalla näytteistystaajuutta.

Ikkunan kaventuminen myös leventää taajuuspiikkejä. Vierekkäiset piikit sulautuvat täten yhteen, mikä heikentää nopeusresoluutiota. Tämäkin ilmiö johtuu lyhyen signaalin diskreetistä Fourier-muunnoksesta. Sen vaikutus on sitä suurempi mitä kapeampi on ikkunafunktio. Ikkunan leventäminen kuitenkin heikentäisi paikkaresoluutiota.

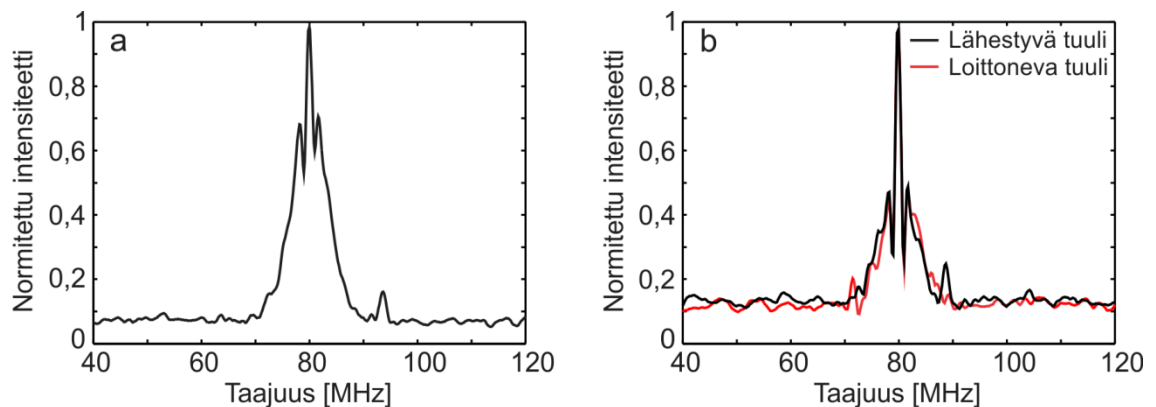
Fotonit siroavat aikaikkunansa sisällä aerosoleista, jotka ovat satunnaisten matkerojen päässä toisistaan. Yksittäisestä pulssista sironneen valon kokonaisvaihe on osoitinsumma eri kenttien vaiheesta ja täten täysin satunnainen. Pulssien vaiheet ovat keskenään satunnaiset, joten aikasignaalin keskiarvostaminen johtaisi nollasignaaliin. Tästä syystä kohdassa 5 keskiarvostetaan yksittäisiä Fourier-muunnoksia. Ohjelma joutuu tällöin laskemaan 1000 Fourier-muunnosta jokaista aikaikkunan paikkaa kohden, mikä nostaa kirjoitetun ohjelman suoritusaikaa merkittävästi. Algoritmin laskenta-aika riippuu siinä suoritettujen operaatioiden lukumäärästä. Diplomityössä kirjoitetussa signaalinkäsittelyohjelmassa laskenta-aika on optimoitu pienentämällä operaatioiden määrä

mahdollisimman pieneen. Koska MATLAB-ohjelmisto on tehty matriisien nopeaa laskua varten, kohdat 2-5 toteutetaan matriisikertolaskuilla ilman aikaa vieviä silmukoita. Käytössä olevalla tietokoneella taajuussuodatus, ikkunafunktion luominen ja taustan vähentäminen kestävät yhteensä noin 1,6 s, jonka jälkeen tuulennopeustieto saadaan halutuilta etäisyyksiltä nopeudella 0,11 s/etäisyys. Eniten aikaa kuluu DAT-tiedoston parsimiseen eli signaalimatriisin ja aikavektorin luomiseen, mikä täytyy suorittaa ennen datan tarkastelua. Tämä vie aikaa noin 93 s.

6.3 Alustavat tuulen nopeusmittaukset ja virhelähteet

Tässä kappaleessa esitellään ensimmäisten tuulimittausten tuloksia. LIDAR-laitteiston kehitystyö on vasta aluillaan ja ensimmäisten mittausten tarkoitus oli varmistaa menetelmän toimivuus ja löytää kehitys- ja ongelma-kohteita. Näissä tavoitteissa onnistuttiin. Laitteistossa vielä olevien haasteiden ja diplomityön aiheen rajaamisen vuoksi edellä mainittuja etäisyyden erottelutarkkuus- ja nopeusresoluutiomittauksia ei sisällytetty tähän työhön.

Kuvassa 6.3 a ja b on kolme taajuusspektriä eri tuulen nopeuksilla. Anemometrillä tuuliputken päistä mitatut virtausnopeudet ovat 11,5 ja 7,7 m/s LIDAR-laitetta kohti ja 6,7 m/s LIDAR-laitteesta poispäin. Piikkien huiput kuvassa 6.3 esiintyvät taajuuksilla 94,0, 88,7 ja 71,5 MHz. Ne vastaavat 10,8 ja 6,7 m/s lähestyvän ja 6,5 m/s loittonevan tuulen nopeuksia.



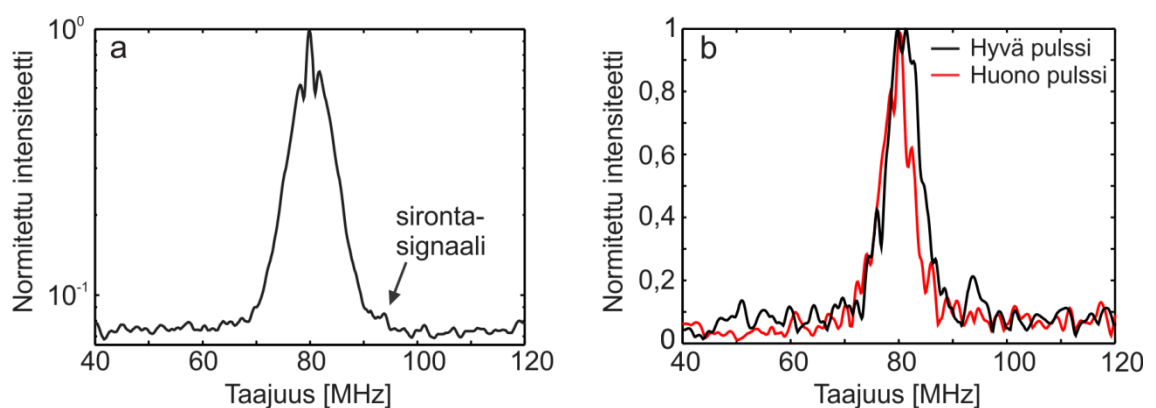
Kuva 6.3 Mitatut huojuntaspektrit. Tuulesta johtuvat taajuuspiikit näkyvät voimakkaan 80 MHz taajuuden vieressä kohdissa
a) 94,0 MHz tuulennopeudella noin 11,5 m/s sekä
b) 88,7 ja 71,5 MHz tuulennopeuksilla noin 7,7 ja 6,7 m/s.
 Voimakas piikki 80 MHz ympärillä johtuu lähtevän tehon vuotamisesta siron-tasignaalin kanavaan. b-kuvan suurempi kohina johtuu keskiarvostettujen spektrien pienemmästä lukumäärästä.

LIDAR-mittauksen hieman pienemmät arvot eivät todennäköisesti johdu laitteiston tai ohjelman virheestä. Heterodyyni-LIDAR laitteiston etuna on systemaattisten virhelähteiden vähäinen määrä. Laitteistoa ei toisin sanoen tarvitse kalibroida, vaan syy arvojen eroavaisuuksiin löytyy mittausolosuhteista. Pistemäisen anemometrimittauksen mittaus-

lukemien odotetaankin olevan LIDAR-mittauksen lukemia suuremmat. Anemometri-mittaus suoritetaan putken keskiakselilta, jossa virtausnopeus on suurimmillaan. Teli-neiden päällä lepäävässä putkessa on useita helposti liikkuvia liitoskohtia, joiden vuoksi putkea on hyvin vaikea saada ideaalisen luotisuoraan. Vaikka lasersäde pyritään ohjaa-maan myös keskiakselille, putken pienen halkaisijan vuoksi 30 m aikana se kulkee osan ajasta lähellä reunoja, jossa virtaus on heikompaa. Koska laitteiston tämänhetkinen pai-kan erottelukyky on pienimmillään 30 m eli puolet laserpulssin pituudesta, tuloksiin keskiarvostuvat kaikki tuulennopeudet koko putken pituudelta.

Kuvissa 80 MHz kohdalla näkyvä voimakas taajuuspiikki on seurausta kuvassa 5.3 näkyvästä pulssien pitkästä vaimenemisajasta. Profiilia nimitetään tässä tekstissä ku-vaavasti pulssin hännäksi. Pulssin lähtiessä laitteistosta pieni osa tehosta vuotaa sirku-laattorin lähtevän haaran yli sirontasäteen haaraan. Säteestä osa myös heijastuu lähetin-vastaanotin –optiikasta takaisin laitteiston sisälle. Sirontasäteen haaraan vuotanut Dopp-ler-siirtymätön kenttä on kuitenkin paljon oikeaa sirontasignaalia voimakkaampaa ja aiheuttaa vahvan taajuuspiikin 80 MHz kohdalle. Ilman pulssin häntää 0-tuulen signaali näkyy vain pulssin lähtöhetken ajan. Rakennetussa LIDAR-laitteistossa 80 MHz piikki näkyy kuitenkin hitaasti vaimentuen usean sadan nanosekunnin ajan. Häntä tekee mitta-ukset pienillä tuulennopeuksilla ja lyhyillä etäisyyksillä erittäin vaikeaksi. Myös suu-remmat tuulennopeudet ovat haastavia, jos käytetään suurta paikan erottelutarkkuutta. Tällöin 80 MHz piikki saattaa levetä yli käytetyn taajuuskaistan.

Toistaiseksi laitteiston tallentama signaali on epävakaa, kun tarkastellaan yksittäi-sistä pulsseista sironnutta signaalia. Kuvassa 6.4 a kuvan 6.3 a data on esitetty uudel-leen. Siinä on keskiarvospektri kaikista 1000 tallennetusta pulssista. Nyt etsitty spektri-viiva on lähes kohinatasolla. Kuva 6.4 b esittää kaksi yksittäisen pulssin spektriä samas-ta mittauksesta. Toisessa tuulen aiheuttama taajuuspiikki on selvästi kohinatason ylä-puolella, mutta toisessa se puuttuu.



Kuva 6.4 Etsityn piikin hukkuminen liikaa keskiarvostamalla ja yksittäisten pulssien spektrien epävakaas.

- Keskiarvospektri 1000 pulssista. Voimakkaalta näyttävä kohina johtuu lo-garitmisesta pystyakselista.
- Kahden yksittäisen pulssin sirontasignaalin diskreetit Fourier-muunnokset. Vain toisessa etsitty taajuuskomponentti on näkyvissä.

Kaikissa tallennetuissa spektreissä piikki näkyy noin 10 % pulsseista. Näissäkin spektreissä taajuuspiikin intensiteetti vaihtelee. Pelkästään pulssien keskiarvostaminen ei tässä tapauksessa siis tuota parhaita tulosta tuulen määrityksen kannalta. Kuvan 6.3 kuvaajissa on keskiarvostettu 250 pulssin joukosta vain spektrit, joissa etsitty taajuuspiikki on selvästi näkyvissä. Epävakauden epäillään johtuvan sironneen kentän polarisaatiotilan satunnaisuudesta. Valon kulku vapaassa tilassa tai siroaminen aerosolihiukkasista ei muuta polarisaatiotilaa. Päinvastainen tilanne on jännityksessä olevissa kuiduissa tai kuitukomponenteissa, joita ei ole suunniteltu säilyttämään polarisaatiota. Huojuntasignaalia ei synny, jos signaaleilla ei ole yhteistä polarisaatiokomponenttia kuten kerrottu kappaleessa 4.2. Signaalin epävakaudesta voi toisaalta johtua myös sirontavalon heikosta kytketymisestä lähtin-vastaanottimen yksimuotokuituun.

Signaalin heikkoudesta johtuen perusteellista lähtin-vastaanottimen vertailua peili- ja linssioptiikoiden välillä ei tehty. Alustavissa mittauksissa käytettiin silti tasaisesti kumpaakin optiikkaa. Kuvien 6.3 ja 6.4 spektrit on mitattu käyttäen peilioptiikkaa. Vaikka linssin ala on alle 20 % primaaripeilin alasta, käytetyillä lyhyillä etäisyyksillä se suoriutui vähintään yhtä hyvin. Syy on todennäköisesti linssin korkealuokkaisempi valmistusprosessi, mistä johtuen se on lähempänä diffraktio-rajoitettua kuin peilioptiikka. Vertailun vuoksi mainittakoon Skywatcher-harrastelijateleskoopin hinnan kaikkine varusteineen olleen halvempi kuin käytetty akromaattinen duplettilinssi. Linssioptiikkaan oli mahdollista rakentaa myös lujempi kuitukytkentä, joka estää kuidun pään hyvin pienet liikkeet.

6.4 Kehitysehdotukset

Heterodyynidetektioilla toimivan tuuli-LIDARin kehitystyöt jatkuvat keskeytymättä tämän diplomityön jälkeenkin. LIDAR-laitteiston toimivuuden varmistuttua seuraava askel on sen suorituskyvyn lisääminen. Seuraavassa listataan edellisissä kappaleissa esiin tulleet suorituskykyä rajoittavat ongelmakohdat ja esitetään kehityssuunnat niiden ratkaisemiseksi. Osa kehityskohteista koskee laitteistoa, mutta mukana ovat myös signaalinkäsittelyohjelman ja mittausolosuhteiden parantaminen.

1. Pulssien häntien poistaminen – Lyhyiltä etäisyyksiltä ja heikkojen tuulien mittaamisen mahdollistamiseksi sekä paikkaresoluution parantamiseksi häntimisen aiheuttajan selvittäminen ja korjaaminen ovat laitteiston tärkeimmät kehitystoimenpiteet. Mahdollisia vikalähteitä ovat AOM ja RF-teholähde, mutta myös detektori sekä kaikki laitteiston koaksiaalikaapelit.
2. Mittausetäisyyden pidentäminen – Pulssien hännän johdosta nykyinen 45 m mittausetäisyys on lähellä laitteiston pienintä mittausetäisyyttä. Jotta laitteiston suorituskykyä voitaisiin paremmin arvioida, lähtevän pulssin vuotosignaali ja takaisinsironnut signaali tulisi saada ajallisesti kauemmas toisistaan. Tämä onnistuu pidentämällä mittausetäisyyttä esimerkiksi 100 metriin, mikä ei ole enää mahdollista väestönsuojan tiloissa. Suunnitteilla on toteuttaa LIDAR-laitteistolla ulkomittauskampanja

Vaisala Oyj:n koekentällä Vantaalla syksyn 2011 aikana. Samalla voidaan määrittää myös laitteiston maksimimittausetäisyys.

3. Laitteiston muuttaminen polarisaation pitäväksi – Signaalin vahvistamiseksi laitteiston muuttaminen kokonaan polarisaation pitäväksi saattaa olla välttämätöntä. Tämä tarkoittaa useiden nykyisten komponenttien korvaamista PM-versioillaan. Se ei aiheuta teknistä haastetta, mutta valmiin laitteiston hintaa se nostaisi tuntuvasti.
4. Signaalinkäsittelyn kehittäminen – Nopeus- ja paikkatarkkuuden samanaikaisen parantamisen vuoksi signaalinkäsittelytyökalujen kehittämistä on jatkettava. Tämä vaatii syvempää perehtymistä signaalinkäsittelyn menetelmiin. Parhaillaan kehitteillä on apuohjelma, joka tekee sinc-muotoisen käyränsovitteen diskreettiin Fouriermuunnokseen yksittäisestä pulssista. Ohjelman avulla pyritään keskiarvospektrien signaali-kohina –suhteen parantamiseen.
5. Referenssimittauksen kehittäminen – Pisteittäinen referenssimittaus ei kerro luotetavasti LIDAR-laitteen suorituskyvystä, koska LIDAR ei koskaan mittaa tuulta vain yhdestä pisteestä. Referenssimittaus tulisi rakentaa siten, että mittauspisteitä olisi säteen polulla useita. Tällainen järjestelmä on suunnitteilla edellä mainittuun ulkomittauskampanjaan. Tuulimittareina koekentällä käytettäisiin Vaisalan ultraäänianemometrejä.
6. Lähetin-vastaanottimen kehittäminen – Sironneen kentän yhdistämistä yksimuoto-kuituun on mahdollista parantaa. Lähetin-vastaanottimen kehitystyössä apuna voisivat olla kaupalliset optiikkasuunnitteluohjelmat kuten Zemax ja FRED. Hyötyä olisi myös aiheesta tehdystä kirjallisuusselvityksestä.

7 Yhteenveto

Tässä diplomityössä suunniteltiin ja rakennettiin kustannustehokas tuuli-LIDAR-mittauslaitteisto. Diplomityön tutkimus on osa CLEEN Oy:n MMEA-tutkimusohjelmaa, jonka yhtenä tavoitteena on kehittää etämittausteknologioita ympäristön havainnointiin. Tuulen etämittauksella voidaan saavuttaa huomattavia säästöjä muun muassa tuulivoimaloiden materiaalikustannuksissa ja suotuisien sijoituspaikkojen löytämisessä. Sillä on käyttökohteita tuulienergian tuotannon ulkopuolellakin. Markkinoiden kysynnän vuoksi, ja koska suorituskykyvaatimukset etämittausteknologialle ovat tuulienergiateollisuudessa muita käyttökohteita pienemmät, tutkimusprojektin ensimmäisessä vaiheessa keskityttiin kuitenkin vain tuulivoiman etämittaustarpeisiin.

LIDAR on ominaisuuksiltaan kilpailijoitaan vaikuttavampi etämittausteknologia. LIDAR-teknologiassa lasersäde ohjataan taivaalle ja etäisen mittaustilavuuden ominaisuuksia tutkitaan takaisin laitteistolle sironneesta valosta. Siroaminen on seurausta lasersäteen ja ilman aerosolien ja molekyylien vuorovaikutuksesta. Tuuli-LIDAR määrittää valon Doppler-siirtymästä ilman hiukkasten kollektiivisen liikkeen, eli tuulen, suunnan. Kolmiulotteisen tuulivektorin laskemiseksi mittaus lasersäteen suunnassa täytyy toistaa vähintään kolmeen eri suuntaan. Mittausetäisyys voidaan määrätä tutkimalla laserpulssin lähdön jälkeen sironnutta signaalia vain tietyn aikaikkunan sisällä.

Radiotaajuuksinen Doppler-siirtymä on hyvin pieni verrattuna optisiin taajuuksiin. Työssä vertailtiin eri menetelmiä Doppler-siirtymän selvittämiseksi. Rakennettavan tuuli-LIDARin detektiomenetelmäksi valittiin heterodyyni-tekniikka. Heterodyyni tarkoittaa Doppler-siirtyneen säteen ohjaamista avaruudellisesti päällekkäin alkuperäisen lasersäteen eli paikallisoskillaattorisäteen kanssa. Seurauksena summakentän intensiteetissä havaitaan värähtelyä signaalien erotustaajuuudella, joka on mahdollista havaita kaupallisilla valodetektoreilla.

Diplomityössä koottu mittauslaitteisto käyttää havainnointiin $1,5\ \mu\text{m}$ aallonpituutta. Valitussa taajuudessa on kaksi merkittävää etua. Ensimmäinen on ftoniikkakomponenttien saatavuus ja edullinen hinta, jotka johtuvat taajuuden yleisyydestä tietoliikennetekniikassa. Jokin muu aallonpituus valittaessa olisi ainakin osan komponenteista joutunut teettämään mittatilaustyönä. Toinen etu on aerosolisironnan suuri vaikutusala tällä aallonpituudella. Doppler-levenemän vuoksi heterodyyni-detektio ei toimi molekyylisironnalla. Kun laitteisto suunnitellaan toimimaan infrapuna-aallonpituuksilla, oletetaan sirontatehon tulevan kokonaan aerosolisironnasta.

Heterodyyni-detektiossa tärkeää on sekoittuneiden optisten kenttien kapea spektrin viivanleveys. Epälineaarisuudet kuituvahvistimissa, kuten SBS, levantävät signaalin spektriä. Taloudellista kuituvahvistinta, joka pystyisi vahvistamaan lähtevää laserpulssia

tarpeeksi paljon ja silti välttämään epälineaariset ilmiöt, ei löytynyt markkinoilta. Tämän vuoksi diplomityön aikana rakennettiin kustannusvaatimukset täyttävä kuituvahvistin. Se koostuu kahdesta vahvistinasteesta ja tarjoaa yli 30 dB vahvistuksen ilman laserpulssin spektraalista leventymistä.

Diplomityön laitteistoon suunniteltiin lisäksi peili- ja linssioptiset lähetinvastaanottimet. Sirontasignaalin jatkokäsittely tehtiin jälkikäteen datan analysointiohjelmalla. Signaalinkäsittelyä varten suunniteltiin ja kirjoitettiin raakadatasta tuulen nopeuden laskeva MATLAB-ohjelma.

Työssä tehdyt mittaukset toteutettiin TTY:n väestönsuojaan rakennetulla tuulitunnelilla. Mittausjärjestelyjen kokoaminen on myös osa diplomityötä. Tunneli koostuu 30 m pitkästä päälinjasta, tuulen suuntaa ja voimakkuutta säättävistä sivukanavista ja tehokkaasta kanavapuhaltimesta. Tuulen nopeuden pisteittäinen vertailumittaus suoritetaan kuumalanka-anemometrillä. Rakennetun laitteiston toimintakyky todennettiin mittaamalla yhdensuuntaisen laminaarisen ilmapirran nopeus. Vaatimattomasta herkkyydestä johtuen laajempi mittauskampanja toteutetaan myöhemmin sekä tuulitunnelissa että ulko-olosuhteissa.

Diplomityön jälkeen tuuli-LIDARia jatkokehitetään suorituskyvyn parantamiseksi. Laitteiston arkkitehtuuri tulee säilymään ennallaan, mutta parannukset komponenteissa ja signaalinkäsittelyn menetelmissä uskotaan nostavan mittauslaitteen suorituskyvyn kaupallisten LIDAR-järjestelmien tasolle. Tämänhetkisen laitteiston hinta on noin 10 % kaupallisten laitteiden myyntihinnoista. Komponenttien muuttaminen polarisaation pitäväksi tulee varmuudella nostamaan kokeellisen laitteiston hintaa. Toisaalta komponenttien ostaminen suoraan valmistajalta suurissa erissä kompensoi hinnan nousua tuotantovaiheessa. On huomattavaa, että taulukon 4.2 mukaan, kaikki kaupallisetkaan sovellukset eivät kykene alle 30 m etäisyyden erottelukykyyyn tai mittaamaan tuulennopeutta 300 m päästä. Vaikka tutkimus on kesken, reilun vuoden käynnissä ollut tutkimusprojekti on täten ottanut pitkän askeleen kohti myyntikelpoista tuuli-LIDAR -tuotetta.

Lähteet

- [1] *Renewables 2010 Global Status Report*. REN21 Renewable Energy Policy Network for the 21st century. Pariisi, 2010. Saatavilla: <http://www.ren21.net/REN21Activities/Publications/GlobalStatusReport/GSR2010/tabid/5824/Default.aspx>
- [2] Stenberg, A. ja Holttinen, H. *Tuulivoiman tuotantotilastot. Vuosiraportti 2009*. VTT, 2010. VTT Working Papers 145. Saatavilla: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2010/W145.pdf>
- [3] *Olkiluoto teki tuotantoennätyksen*. Tekniikka&Talous. Energia-verkkolehti. 4.1.2010. Viitattu 19.7.2011. Saatavilla: <http://www.tekniikkatalous.fi/energia/olkiluoto+teki+tuotantoennatyksen/a361690>
- [4] Mikkelsen, T. *Remote Sensing of Wind*. Teoksessa Peña, A. ja Hasager, C. B. *Remote Sensing for Wind Energy*. Risø National Laboratory for Sustainable Energy, DTU, 2010.
- [5] CLEEN Oy:n kotisivut. Viitattu: 16.7.2011. Saatavilla: <http://www.cleen.fi>
- [6] Seinfeld, J. H. ja Pandis, S. N. *Atmospheric chemistry and physics : from air pollution to climate change*. 2. painos. Hoboken, Wiley, 2006. s. 98-111, 691-719, 736-737.
- [7] Tykistöprikaati, Tiedustelupatteristo, Tiedustelu- ja Sääkoulu. *Sääoppi*. Niinisalo, 1993.
- [8] Mann, J. *Atmospheric turbulence*. Teoksessa Peña, A. ja Hasager, C. B. *Remote Sensing for Wind Energy*. Risø National Laboratory for Sustainable Energy, DTU, 2010.
- [9] Karttunen, H., Koistinen, J., Saltikoff, E. ja Manner, O. *Ilmakehä ja sää*. 4. painos. Helsinki, Ursa, 2002. s. 8-16, 35-36, 62-82, 88-103, 136-139.
- [10] Emeis, S. et al. Teoksessa Peña, A. ja Hasager, C. B. *Remote Sensing for Wind Energy*. Risø National Laboratory for Sustainable Energy, DTU, 2010. luvut 9-11.
- [11] Wikipedia. *"LIDAR"*. Viitattu: 29.5.2011. Saatavilla: <http://en.wikipedia.org/wiki/Lidar>
- [12] Hulburt, E. O. *Observations of a Searchlight Beam to an Altitude of 28 Kilometers*. Journal of the Optical Society of America, 1937, nro. 11, vuosik. 27, s. 377-382.
- [13] Johnson, E. A. et al. *The Measurement of Light Scattered by the Upper Atmosphere from a Search-Light Beam*. Journal of the Optical Society of America, 1939, nro. 12, vuosik. 29, s. 512-517.

- [14] Chu, X. *ASEN-6519 Lidar Remote Sensing -kurssimateriaali*. Boulder, University of Colorado, 2008.
- [15] Arecibo LIDAR kotisivut. National astronomy and Ionosphere Center (NAIC) Arecibo Observatory. Puerto Rico. Viitattu: 9.8.2011. Saatavilla: <http://www.naic.edu/~lidar/>
- [16] Grant, W. B. et al. *Introduction*. Teoksessa Grant, W. B. *Selected papers on laser applications in remote sensing*. SPIE Optical Engineering Press, 1997.
- [17] Tepley, C. A. et al. *Initial Doppler Rayleigh lidar results from Arecibo*. Geophysical Research Letters, 1991, nro. 2, vuosik. 18, s. 167-170.
- [18] NOAA ESRL LIDAR kotisivut. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Viitattu 9.8.2011. Saatavilla: <http://www.esrl.noaa.gov/csd/lidar/>
- [19] Calipso-ohjelma kotisivut. NASA. Viitattu 9.8.2011. Saatavilla: <http://www-calipso.larc.nasa.gov/>
- [20] Huffaker, R.M. ja Hardesty, R.M. *Remote sensing of atmospheric wind velocities using solid-state and CO2 coherent laser systems*. Proceedings of the IEEE, 1996, nro. 2, vuosik. 84, s. 181-204.
- [21] Shen, F. et al. *Low Tropospheric Wind Measurement with Mie Doppler Lidar*. Optical Review, 2008, nro. 4, vuosik. 15, s. 204-209.
- [22] Xia, H. et al. *Fabry-perot interferometer based Mie Doppler lidar for low tropospheric wind observation*. Applied Optics, 2007, nro. 29, vuosik. 46, s. 7120-2431.
- [23] Liu, Z. et al. *Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with an iodine filter*. Applied Optics, 2002, nro. 33, vuosik. 41, s. 7079-7086.
- [24] Liu, Z. et al. *Seed injection and frequency-locked Nd:YAG laser for direct detection wind lidar*. Optics & Laser Technology, 2007, nro. 3, vuosik. 39, s. 541-545.
- [25] She, C. et al. *Direct-detection Doppler wind measurements with a Cabannes-Mie lidar: A. Comparison between iodine vapor filter and Fabry-Perot interferometer methods*. Applied Optics, 2007, nro. 20, vuosik. 46, s. 4434-4443.
- [26] Mann, J. et al. *Comparison of 3D turbulence measurements using three staring wind lidars and a sonic anemometer*. Meteorologische Zeitschrift, 2009, nro. 2, vuosik. 18, s. 135-140.
- [27] Sjöholm, M. et al. *Spatial averaging-effects on turbulence measured by a continuous-wave coherent lidar*. Meteorologische Zeitschrift, 2009, nro. 3, vuosik. 18, s. 281-287.
- [28] Peña, A. et al. *Measurements and Modelling of the Wind Speed Profile in the Marine Atmospheric Boundary Layer*. Boundary-Layer Meteorology, 2008, nro. 3, vuosik. 129, s. 479-495.
- [29] Peña, A. et al. *Offshore wind profiling using light detection and ranging measurements*. Wind Energy, 2009, nro. 2, vuosik. 12, s. 105-124.

- [30] *Making the Skies Safe from Windshear*. NASA. Viitattu: 29.5.2011. Saatavilla: <http://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/Windshear.html>
- [31] Suomen tuulivoimayhdistys. *Tuulivoimatieto.fi*. Viitattu: 29.5.2011. Saatavilla: <http://www.tuulivoimatieto.fi/>
- [32] Stenberg, A. *Analys av vindkraftsstatistik i Finland. Diplomarbete*. Helsinki 2010, Aalto-universitetet, Fakulteten för elektronik, kommunikation och automation.
- [33] Barthelmie, R. J. et al. *Climatological and meteorological aspects of predicting offshore wind energy*. Teoksessa Peña, A. ja Hasager, C. B. *Remote Sensing for Wind Energy*. Risø National Laboratory for Sustainable Energy, DTU, 2010.
- [34] Wagner, R. *What can remote sensing contribute to power curve measurements?* Teoksessa Peña, A. ja Hasager, C. B. *Remote Sensing for Wind Energy*. Risø National Laboratory for Sustainable Energy, DTU, 2010.
- [35] Peña, A. *Lidars and wind profiles*. Teoksessa Peña, A. ja Hasager, C. B. *Remote Sensing for Wind Energy*. Risø National Laboratory for Sustainable Energy, DTU, 2010.
- [36] Schlipf, D. *Lidars and wind turbine control*. Teoksessa Peña, A. ja Hasager, C. B. *Remote Sensing for Wind Energy*. Risø National Laboratory for Sustainable Energy, DTU, 2010.
- [37] Harris, M. et al. *Lidar for Turbine Control*. NREL, 2006. Technical report. NREL/TP-500-39154.
- [38] *Auringon ja veden energiaa käyttävä puutarhuri haaveilee tuulivoimalasta*. Aamulehti. Tampere & naapurit. 29.9.2010, s. 9.
- [39] Bohren, G. ja Huffman, D. R. *Absorption and scattering of light by small particles*. New York, Wiley, 1983. s. 57-136, 381-389.
- [40] Dho, S. W. ja Lee, S. S. *Application of Geometrical Form Factor in Measurement of Attenuation Coefficient of Atmosphere*. Optical Review, 1999, nro. 3, vuosik. 6, s. 163-166.
- [41] Dho, S. et al. *Experimental determination of a geometric form factor in a lidar equation for an inhomogeneous atmosphere*. Applied Optics, 1997, nro. 24, vuosik. 36, s. 6009-6010.
- [42] Wandinger, U. *Introduction to Lidar*. Teoksessa Weitkamp, C. *Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*. New York, Springer, 2005.
- [43] Carrig, T. ja Gatt, P. *Laser Remote Sensing, Short Course Notes*. San Jose, CLEO konferenssi, 2010. s. 69-89.
- [44] Whiteman, D. N. *Examination of the traditional Raman lidar technique. I. Evaluating the temperature-dependent lidar equations*. Applied Optics, 2003, nro. 15, vuosik. 42, s. 2571-2592.
- [45] Mansfield, M. ja O'Sullivan, C. *Understanding Physics*. Chichester, Wiley, 1998. s. 338-341.

- [46] Harris, M. *Introduction to continuous-wave Doppler lidar*. Teoksessa Peña, A. ja Hasager, C. B. *Remote Sensing for Wind Energy*. Risø National Laboratory for Sustainable Energy, DTU, 2010.
- [47] Hernberg, R. *Optisen spektroskopian menetelmät -kurssin opintomateriaali*. Tampereen teknillinen yliopisto, Fysiikan laitos.
- [48] Werner, C. *Doppler Wind Lidar*. Teoksessa Weitkamp, C. *Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*. New York, Springer, 2005.
- [49] Yariv, A. ja Yeh, P. *Photonics: Optical electronics in modern communications*. 6. painos. New York, Oxford University Press, 2007. s. 465-538.
- [50] Paschotta, R. RP-Photonics. "Shot noise". Viitattu: 1.6.2011. Saatavilla: http://www.rp-photonics.com/shot_noise.html
- [51] Paschotta, R. RP-Photonics. "Relative Intensity Noise". Viitattu: 1.6.2011. Saatavilla: http://www.rp-photonics.com/relative_intensity_noise.html
- [52] Winzer, P. J. ja Leeb, W. R. *Fiber coupling efficiency for random light and its applications to lidar*. Optics Letters, 1998, nro. 13, vuosik. 23, s. 986-988.
- [53] Menzies, R. T. ja Hardesty, M. R. *Coherent Doppler Lidar for Measurements of Wind Fields*. Proceedings of the IEEE, 1989, nro. 3, 1989, vuosik. 77, s. 449-462.
- [54] Teich, M. C. *The Physics of Heterodyne Detection in the Far-Infrared: Transition from Electric-Field to Photon-Absorption Detection in a Simple System*. Toimittanut Katzburg, S. ja Hoell, J. M. Proc. International Conf. on Heterodyne Systems and Technology (NASA Conference Publication No. 2138), Langley, Washington DC, NASA, 1980. s. 1-10.
- [55] Richter, L. E. et al. *Linewidth Determination from Self-Heterodyne Measurements with Subcoherence Delay Times*. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, nro. 11, vuosik. 22, s. 2070-2074.
- [56] Paschotta, R. RP-Photonics. "Self-Heterodyne Linewidth Measurement". Viitattu: 9.8.2011. Saatavilla: http://www.rp-photonics.com/self_heterodyne_linewidth_measurement.html
- [57] Paschotta, R. RP-Photonics. "Optical Heterodyne Detection". Viitattu: 1.6.2011. Saatavilla: http://www.rp-photonics.com/optical_heterodyne_detection.html
- [58] Paschotta, R. RP-Photonics. "Coherence". Viitattu: 1.6.2011. Saatavilla: <http://www.rp-photonics.com/coherence.html>
- [59] Flesia, C. ja Korb, L. C. *Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement*. , Applied Optics, 1990, nro. 3, vuosik. 38, s. 432-440.
- [60] Korb, L. C. et al. *Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement*. Applied Optics, 1998, nro. 15, vuosik. 37, s. 3097-3104.
- [61] McKay, J. A. *Modeling of direct detection Doppler wind lidar. I. The edge technique*. Applied Optics, 1998, nro. 27, vuosik. 37, s. 6480-6486.
- [62] Korb, L. C. et al. *Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind*. Applied Optics, 1992, nro. 21, vuosik. 31, s. 4202-4213.

- [63] Souprayen, C. et al. *Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. II. Mie scattering effect, theory, and calibration*. Applied Optics, 1999, nro. 12, vuosik. 38, s. 2422-2431.
- [64] Yue, J. et al. *A comparative study on Fabry-Perot interferometer and iodine vapor filter for direct detection Doppler wind measurements with a Cabanne-Mie lidar*. 23rd International Laser Radar Conference proceedings.
- [65] Shibata, Y. et al. *Incoherent Doppler lidar controlling actively the laser wavelength*. 20th Laser Sensing Symposium proceedings, 1999, s. 169-172.
- [66] McKay, J. A. *Modeling of direct detection Doppler wind lidar. II. The fringe imaging technique*. Applied Optics, 1998, nro. 27, vuosik. 37, s. 6487-6493.
- [67] Souprayen, C. et al. *Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. I. Instrumental setup, validation, and first climatological results*. Applied Optics, 1999, nro. 12, vuosik. 38, s. 2410-2421.
- [68] Gentry, B. et al. *Wind measurements with 355-nm molecular Doppler lidar*. Optics Letters, 2000, nro. 17, vuosik. 25, s. 1231-1233.
- [69] Flesia, C. et al. *Double-edge molecular measurement of lidar wind profiles at 355 nm*. Optics Letters, 2000, nro. 19, vuosik. 25, s. 1466-1468.
- [70] Cariou, J. *Pulsed coherent lidars for remote wind sensing -esitys. PhD Summer School: Remote Sensing for Wind Energy -kurssimateriaali*. Risø National Laboratory for Sustainable Energy, DTU, 2010.
- [71] Bingöl, F. *Complex terrain and lidars*. Teoksessa Peña, A. ja Hasager, C. B. *Remote Sensing for Wind Energy*. Risø National Laboratory for Sustainable Energy, DTU, 2010.
- [72] Becker, P. C., Olsson, N. A. ja Simpson, J. R. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology*. San Diego, Academic Press, 1999. s. 1-27, 43-75.
- [73] Yariv, A. ja Yeh, P. *Photonics: Optical electronics in modern communications*. 6. painos. New York, Oxford University Press, 2007. s. 110-149.
- [74] Paschotta, R. RP-Photonics. *"Polarization-maintaining Fibers"*. Viitattu: 14.6.2011. Saatavilla: http://www.rp-photonics.com/polarization_maintaining_fibers.html
- [75] Hecht, E. *Optics*. 4. painos. San Francisco, Addison Wesley, 2002. s. 336-344.
- [76] Becker, P. C., Olsson, N. A. ja Simpson, J. R. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology*. San Diego, Academic Press, 1999. s. 46.
- [77] Yariv, A. ja Yeh, P. *Photonics: Optical electronics in modern communications*. 6. painos. New York, Oxford University Press, 2007. s. 38-42.
- [78] Hecht, E. *Optics*. 4. painos. San Francisco, Addison Wesley, 2002. s. 366-368.
- [79] Yariv, A. ja Yeh, P. *Photonics: Optical electronics in modern communications*. 6. painos. New York, Oxford University Press, 2007. s. 446-461.
- [80] AA Opto-Electronic. www.acoustooptic.com. Viitattu: 13.7.2011. Saatavilla: <http://www.acoustooptic.com/>
- [81] Poon, T-C. ja Kim, T. *Engineering Optics with MATLAB*. Singapore, World Scientific, 2006. s. 152-171.

- [82] Yariv, A. ja Yeh, P. *Photonics: Optical electronics in modern communications*. 6. painos. New York, Oxford University Press, 2007. s. 673-738.
- [83] Streetman, B. G. ja Banerjee, S. K. *Solid state electronic devices*. 6. painos. New Jersey, Pearson Prentice-Hall, 2009. s. 180-205, 398-433.
- [84] Streetman, B. G. ja Banerjee, S. K. *Solid state electronic devices*. 6. painos. New Jersey, Pearson Prentice-Hall, 2009. s. 12-25, 64-85.
- [85] Rantala, T. *Puolijohdetekniikan perusteet -kurssin opintomateriaali*. Tampereen teknillinen yliopisto, Fysiikan laitos, 2008.
- [86] Yariv, A. ja Yeh, P. *Photonics: Optical electronics in modern communications*. 6. painos. New York, Oxford University Press, 2007. s. 555-586.
- [87] Yariv, A. ja Yeh, P. *Photonics: Optical electronics in modern communications*. 6. painos. New York, Oxford University Press, 2007. s. 387-391.
- [88] Becker, P. C., Olsson, N. A. ja Simpson, J. R. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology*. San Diego, Academic Press, 1999. s. 237-238.
- [89] Hecht, E. *Optics*. 4. painos. San Francisco, Addison Wesley, 2002. s. 253-276, 467-471.
- [90] Allen, C. et al. *Performance of a 1319 nm laser radar using RF pulse compression*. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '01. IEEE International), Sydney, 2001, vuosik. 3, s. 997 - 999.
- [91] Sacek, V. telescope-optics.net. "Obstruction" Viitattu: 8.7.2011. Saatavilla: <http://www.telescope-optics.net/obstruction.htm>